

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Л. П. ПЕТРОВ
Р. Г. ПОДЗОЛОВ
Л. В. БУШТЯН

**ЭЛЕКТРО-
АВТОМАТИКА
СТАНКОВ**

**Автоматическое
управление
торможением
станочных
электроприводов**



Редакционная коллегия: д-р техн. наук проф. И. В. Харизомов (председатель), лауреат Государственной премии СССР, д-р техн. наук В. М. Киселев, лауреат Ленинской премии В. В. Крыленко, канд. техн. наук Л. Л. Макаров, доц. Ю. Е. Михеев, лауреат Ленинской премии А. П. Никольский, инж. П. П. Песков, инж. В. Г. Подзияков, канд. техн. наук Э. Л. Тихомиров.

Рецензент канд. техн. наук В. Е. Стоколов

Петров Л. П. и др.

ПЗ0 Автоматическое управление торможением станочных электроприводов/Л. П. Петров, Р. Г. Подзолов, Л. В. Буштян. — М.: Машиностроение, 1978. — 135 с., ил. — (Электроавтоматика станков).

45 к.

В книге описаны различные способы автоматического управления электрическим торможением наиболее распространенных в станкостроении электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями для получения быстрой и точной остановки исполнительных механизмов; дан расчет тормозных устройств. Приведены технико-экономические показатели эффективности различных приводов; основное внимание уделено новым способам комбинированного торможения с применением конденсаторов и управляемых клапанов.

П 30307-146
038(01)-78 146-78

ББК 31.26
6П4.6.08

Повышение производительности всех видов металлообработки в значительной степени связано с уменьшением вспомогательного времени, что может быть достигнуто путем автоматизации таких вспомогательных операций, как смена инструмента, обрабатываемой детали и режима обработки. При этом не только увеличивается доля рабочего времени и, следовательно, производительность станка, но и существенно повышаются его точность и надежность.

Автоматизация вспомогательных операций требует, в свою очередь, автоматического управления такими режимами привода, как переключение скоростей, реверсирование, быстрая остановка и позиционирование, что связано с необходимостью реализации эффективного и точного его торможения при большом числе включений в единицу времени.

При применении электроприводов постоянного тока эффективное электрическое торможение реализуется просто и экономично. Однако в станкостроении наиболее распространен простой и дешевый электропривод с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, обладающими малой управляемостью. Поэтому решение задачи автоматического управления эффективным торможением большинства станочных электроприводов представляло до последнего времени значительные трудности, что сдерживало развитие автоматизации.

Авторы доказали эффективность и целесообразность применения конденсаторов для возбуждения режима электрического торможения асинхронных двигателей и сформулировали принцип совмещения нескольких тормозных режимов.

На этой основе были разработаны и исследованы новые эффективные и экономичные методы комбинированного электрического торможения электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, позволяющие реализовать автоматическое управление тормозными режимами с получением необходимой интенсивности и точности остановки подвижных узлов станочных механизмов.

Вместе с тем появление большого числа новых способов торможения, многообразие тормозных устройств и их схемных решений, в разработке которых деятельное участие принимали

ОПИ, ЭНИМС, ОСКБСС, СКБАЛ, СКБ ЗШ и ЗС и другие организации, значительно усложнило выбор наиболее рациональных из них.

Обилие возможных вариантов, основанных на использовании сложных электромеханических процессов, в которых существенную роль играют быстропротекающие электромагнитные переходные явления, а также недостаточное отражение этих вопросов в технической литературе препятствуют широкому внедрению новых возможностей в управлении тормозными режимами и, следовательно, в повышении производительности, точности и надежности многих металлообрабатывающих станков. В связи с развитием тиристорной техники и расширяющимся применением бесконтактных тиристорных коммутаторов в книге рассмотрены основные особенности физики тормозных режимов при тиристорном управлении и принципы их наиболее рациональной реализации.

В книге в основном использован опыт кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Одесского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института в разработке и исследовании новых способов торможения асинхронных электроприводов и управления ими. Все рекомендации и параметры схем разработаны применительно к наиболее распространенным двигателям серии А2 общепромышленного исполнения. Проведенные расчеты и предварительные эксперименты показывают, что они в основном справедливы и для двигателей нормального исполнения серии 4А.

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

СПОСОБЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Электрическое торможение станочных приводов заключается в преобразовании кинетической энергии, запасенной движущимися элементами двигателя и приводимого механизма, в электрическую, которая преобразуется, как правило, в тепловую и расходуется на нагрев внутренних и внешних цепей электродвигателя. Процесс преобразования механической энергии в электрическую является генераторным режимом работы асинхронной машины, возбуждение которого происходит при определенных условиях за счет энергии магнитного поля. Источники этой возбуждающей генераторной энергии могут быть различными. Таким образом, все тормозные режимы являются генераторными и отличаются друг от друга только способом возбуждения процесса преобразования механической энергии в электрическую; поэтому характер и особенности тормозных режимов определяются главным образом видом возбуждающей энергии.

Источником возбуждающей энергии могут быть как питающая двигатель электрическая сеть, так и элементы, способные накапливать электрическую или электромагнитную энергию. К таким элементам относятся в первую очередь конденсаторы и катушки со сталью. Число схемных решений, реализующих тормозные устройства, велико и продолжает непрерывно расти. В зависимости от сочетания контактных и бесконтактных элементов схемы управления может существенно меняться характер и интенсивность тормозного процесса. Однако суть его и основные особенности будут во всех случаях определяться видом возбуждающей энергии, поэтому наиболее удобно и целесообразно классифицировать способы электрического торможения асинхронных двигателей по виду возбуждающей энергии и соответственно способу возбуждения процесса преобразования энергии.

Если источником возбуждающей энергии является сеть переменного тока, к которой непосредственно подключен асинхронный двигатель, то преобразование механической энергии в электрическую возможно при выполнении одного из двух условий: скорость ротора превышает скорость магнитного поля

($s < 0$) или ротор вращается противоположно магнитному полю ($s > 1$). В первом случае способ торможения принято называть *рекуперативным*, поскольку преобразованная механическая энергия может поступать в сеть. Во втором случае речь идет о торможении противовключением, *противотоковым* (противотоком) или *противопольном* (противополем). Поскольку способ включения является лишь одним из условий реализации диссипативного тормозного режима, возбуждаемого за счет различного направления вращения ротора и поля, постольку второй и особенно третий термины больше соответствуют сути торможения, чем первый, который поэтому следует признать наименее удачным; однако он широко распространен и поэтому используется в дальнейшем изложении наряду с более удобным вторым термином.

Если возбуждающая энергия поступает от постороннего источника постоянного или выпрямленного направления, то процесс преобразования возможен при любой скорости ротора и такой способ торможения условно называют *динамическим*.

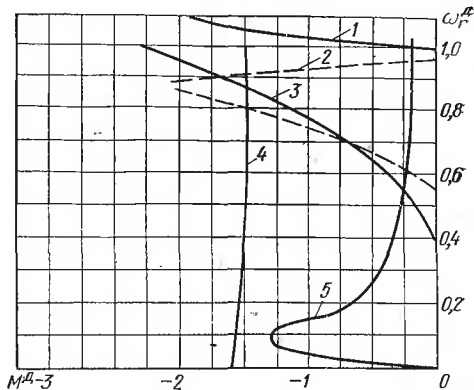
Если к статорным обмоткам отключенного от питающей сети вращающегося двигателя подключены конденсаторы, то при определенной частоте вращения происходит процесс самовозбуждения (емкостного возбуждения) машины, которая начинает работать в генераторном режиме. В этом случае процесс преобразования энергии возбуждается или за счет энергии, запасенной в магнитном поле машины и сохранившейся до момента подключения конденсаторов, или за счет энергии электрического поля предварительно заряженных конденсаторов. В дальнейшем в процессе торможения возбуждающая энергия пополняется за счет преобразования кинетической энергии движущихся масс. Такой способ торможения правильней всего называть *емкостным*. Однако широкое распространение получил термин *конденсаторное* торможение.

Возбуждение генераторного режима возможно и за счет использования электромагнитной энергии, запасаемой магнитной цепью двигателя и сохраняющейся в течение некоторого времени после его отключения от сети. Если при этом обмотки статора двигателя замкнуты, то возбуждается кратковременный генераторный режим независимо от величины скорости вращения ротора, существующий, пока не исчезнет возбуждающая его энергия, запасенная электромагнитным полем двигателя. Такой способ торможения называют *магнитным*, индукционным или коротким замыканием. Первое из этих названий представляется наиболее удачным, поскольку в наибольшей степени отражает существо способа возбуждения режима и поэтому используется в дальнейшем изложении.

Из перечисленных пяти основных способов торможения асинхронных двигателей в практике станочного электропривода наиболее широко применяют четыре. Неуправляемое рекупе-

Рис. 1. Механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при различных способах торможения:

1 — рекуперативном РТ; 2 — магнитном МТ; 3 — конденсаторном КТ; 4 — противотоковым ПТ; 5 — динамическом ДТ



ративное торможение (РТ), возможное при сверхсинхронной скорости, используется только при переходе с высшей на низшую скорость в приводах с многоскоростными двигателями. Типовые механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при пяти основных способах торможения приведены на рис. 1.

Момент M и скорость вращения ω_r ротора двигателя выражены, как и везде в дальнейшем, в долях соответственно от номинального момента и синхронной скорости поля, что отмечено верхним индексом д. Характеристики четырех основных для станочного привода способов электрического торможения — противотокового, динамического, конденсаторного и магнитного (сокращенно обозначаемые соответственно ПТ, ДТ, КТ и МТ) показаны жирными линиями.

Характеристика МТ является условной и показана на рисунке штриховой линией, поскольку этот способ торможения существует кратковременно и механическую статистическую характеристику для него получить нельзя.

Характеристика МТ является условной и показана на рисунке штриховой линией, поскольку этот способ торможения существует кратковременно и механическую статистическую характеристику для него получить нельзя.

Механические характеристики конденсаторного и магнитного торможения удачно дополняют характеристику динамического торможения, и их совмещение позволяет изменять как форму, так и величину тормозного момента для управления характером и интенсивностью тормозного режима. Принцип совмещения тормозных режимов получил всеобщее признание и широко распространен в станочном электроприводе.

Наиболее широко применяют конденсаторно-динамическое (КДТ), конденсаторно-магнитное (КМТ) и магнитно-динамическое (МДТ) торможения; применяют также конденсаторно-противотоковое (КПТ), противотоково-динамическое (ПДТ) (двухтоковое) торможения [9]. Возможны и более сложные сочетания четырех основных способов торможения, как, например, конденсаторно-магнитно-динамическое (КМДТ) [24].

Выбор как сочетания, так и последовательности действия основных способов торможения зависит от их свойств и задач, которые следует решать применением такого *комбинированного* способа торможения. Возможные способы комбинированного

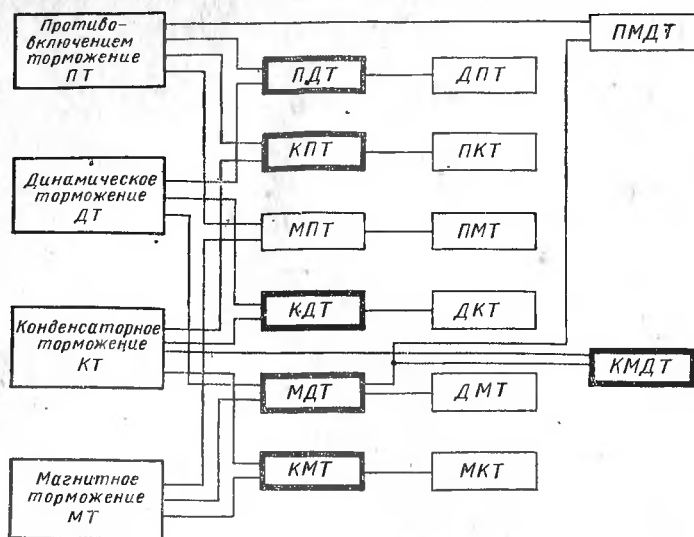


Рис. 2. Возможные способы электрического торможения асинхронных короткозамкнутых двигателей приводов станков

торможения асинхронных короткозамкнутых двигателей получают сочетанием четырех основных, показанных на рис. 2 в первой колонке слева. Во второй колонке расположены способы комбинированного двухступенчатого торможения, нашедшие применение в практике станочного электропривода; в третьей колонке расположены возможные, но мало рациональные способы двухступенчатого комбинированного торможения; в четвертую колонку вынесены способы трехступенчатого комбинированного торможения, применение которых в отдельных случаях может оказаться рациональным. Наиболее эффективные и рациональные способы комбинированного торможения обведены жирными линиями. Последовательность действия отдельных тормозных режимов в пределах данного комбинированного способа торможения соответствует его названию. Название КМТ, например, определяет не только сочетание конденсаторного и магнитного торможения, но и последовательность действия сначала конденсаторного, а затем магнитного.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ

Тормозной режим, как и всякий режим преобразования энергии, может быть установившимся и переходным. Установившийся режим характеризуется постоянством частоты вращения и, следовательно, величины кинетической, электрической и

магнитной энергии, запаасаемой соответствующими элементами электропривода, и возможен при равенстве активного момента нагрузки, являющегося причиной движения и развиваемого двигателем тормозного момента. Такой режим равновесия типичен для подъемных механизмов при опускании груза и не характерен для станочного электропривода, в котором торможение применяется для интенсивного останова подвижных частей станка.

При всяком нарушении установившегося режима возникает электромеханический переходный процесс, связанный с изменением величин всех трех видов энергии, которое не может происходить мгновенно. Если энергия магнитного поля изменяется настолько медленнее изменения частоты вращения двигателя, что величину его магнитного потока можно считать постоянной, то переходный процесс рассматривается как чисто механический. Электромагнитные явления, обусловленные изменением величины магнитной энергии, могут иметь место как при постоянной, так и при меняющейся частоте вращения и соответственно величине кинетической энергии. Только в первом случае переходный режим может рассматриваться как чисто электромагнитный.

Характер протекания любого переходного процесса электропривода определяется зависимостью развиваемого двигателем момента от его частоты вращения, которая, будучи выраженной графически, называется механической характеристикой. Механические характеристики делят на статические и динамические.

Статическая механическая характеристика — характеристика, построенная без учета электромагнитных переходных явлений; она представляет собой всего лишь геометрическое место точек равновесия механической системы электропривода. С помощью статических механических характеристик можно анализировать чисто механический переходный процесс, когда учитывается только механическая инерция привода.

Динамическая механическая характеристика — характеристика, учитывающая влияние электромагнитных переходных явлений и отражающая действительную связь между мгновенными величинами момента двигателя и скорости вращения его в процессе перехода системы электропривода из одного равновесного состояния в другое. Динамические характеристики отражают (в координатах момент вращения — скорость) реальный электромеханический переходный процесс.

Динамическая механическая характеристика существенно зависит не только от параметров двигателя, но и от параметров всего электропривода. Изменение, например, момента инерции или момента нагрузки меняет степень влияния электромагнитного момента на протекание переходного процесса и соответственно вызывает изменение динамической механической характеристики. Следовательно, асинхронный электродвигатель любого станочного привода обладает в данном режиме одной ста-

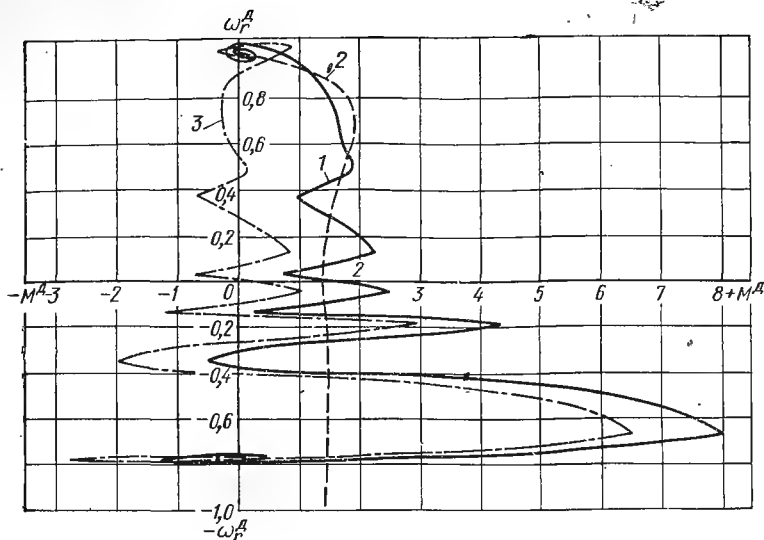


Рис. 3. Динамическая и статическая механические характеристики асинхронного двигателя АО2-41-6 при реверсе

тической и бесконечно большим числом динамических характеристик.

Экспериментальные статическая и динамическая механические характеристики (рис. 3) асинхронного двигателя режима реверса существенно различаются, что обусловлено действием электромагнитного момента (кривая 3). Статическая характеристика 2 получена, как обычно, измерениями величины момента при различных заданных постоянных величинах частоты вращения двигателя. Динамическая характеристика 1 построена по осциллограммам изменения момента и скорости вращения двигателя в процессе реверса. Максимальный пик фактически действующего тормозного момента более чем в 5 раз превышает величину, определяемую статической характеристикой. Соответственно изменяется и величина замедления привода, а также динамические силы в его кинематической цепи. Существенно отличаются от рассчитанных по статической характеристике время и путь торможения. Следовательно, анализ режима реверса или особенно режима торможения по данной статической характеристике приводит к существенным ошибкам.

Электромагнитный переходный момент затухает тем быстрее, чем выше частота вращения двигателя, поэтому влияние электромагнитного переходного момента на переходный режим в целом в значительной степени зависит от инерционности привода. Если суммарный приведенный к частоте вращения ротора момент инерции вращающихся масс привода превышает пяти-

кратную величину момента инерции собственно ротора двигателя, то влияние электромагнитных переходных моментов на время переходного процесса пренебрежительно мало. В этом случае ощутимо сказываются только удары в элементах передачи, обусловленные значительной величиной пиков переходного момента.

Для малоинерционных приводов, у которых суммарный момент инерции привода не превышает двукратной величины момента инерции ротора, влияние электромагнитных переходных моментов должно быть обязательно учтено и анализ переходных режимов следует проводить по динамическим характеристикам. Ошибка в определении времени и особенно пути может при пользовании статическими характеристиками достигать до 100%. Приводы с большей чем двукратной величиной суммарного момента инерции в дальнейшем авторы называют *инерционными*. Большинство станочных приводов относятся к малоинерционным, и поэтому при анализе их переходных режимов, в том числе и тормозных, необходимо учитывать влияние электромагнитных переходных явлений. Для анализа этих режимов нельзя использовать статические механические характеристики, которые в таких приводах могут служить лишь для ориентировочной качественной оценки режима. Существенное влияние электромагнитных переходных моментов на процессы торможения станочных приводов обуславливает необходимость остановиться на причинах, их вызывающих, и принципах управления ими.

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПЕРЕХОДНЫМИ МОМЕНТАМИ

Электромагнитные переходные моменты возникают при всякой коммутации цепей асинхронного двигателя и резком изменении скорости его вращения. Возникновение этих моментов обусловлено изменением величины магнитного потока машины и вызванным этим появлением свободной составляющей потока и соответственно тока намагничивания. Неподвижная в пространстве свободная апериодическая составляющая потока взаимодействует с токами ротора и создает свободную составляющую электромагнитного момента, затухающую вместе со свободной составляющей тока намагничивания.

Если вместе со свободной составляющей потока существует и вынужденная, то токи в роторе, наведенные этой вынужденной составляющей, взаимодействуя со свободной составляющей потока, образуют свободную составляющую электромагнитного момента, пульсирующую в пространстве с частотой токов ротора. Эта пульсирующая составляющая момента накладывается на его постоянную составляющую, образованную вынужденной составляющей магнитного потока и током ротора.

Совместное действие двух составляющих создает результирующий знакопеременный электромагнитный переходный момент. Изменение скорости вращения ротора и появление свободных составляющих токов, связанных с магнитными полями рассеяния, обуславливают появление небольших добавочных знакопеременных составляющих момента, которые могут усиливать или ослаблять действие основного переходного момента, увеличивая или уменьшая его максимальные значения и время затухания.

Если вынужденная составляющая потока отсутствует и соответственно токи ротора наводятся свободной составляющей магнитного потока, то от их взаимодействия образуется затухающий во времени электромагнитный переходный момент одного знака. Чем больше величина аperiodической свободной составляющей потока, тем больше начальная величина электромагнитного переходного момента. Величина аperiodической составляющей определяется начальной скоростью изменения магнитного потока. Следовательно, чем медленнее меняется магнитный поток, тем меньше величина возникающего переходного электромагнитного момента и его влияние на переходный процесс в целом.

При коммутации цепей двигателя быстрота изменения его магнитного потока определяется значениями последнего как после, так и до коммутации. Состояние магнитной цепи машины в момент коммутации характеризуется величиной и пространственной ориентацией магнитного потока машины, которые принято называть начальными электромагнитными условиями. Если в момент коммутации магнитный поток отсутствует, то имеют место нулевые начальные условия.

При ненулевых начальных условиях в зависимости от взаимной пространственной ориентации потоков машины (начального и создаваемого за счет подключения) скорость изменения потока может меняться в значительных пределах. Соответственно изменяется и величина электромагнитного переходного момента, поэтому один из наиболее эффективных способов управления электромагнитными переходными моментами заключается в создании благоприятных начальных электромагнитных условий, ограничивающих пределы изменения магнитного потока при коммутации. Другими способами управления являются ограничение установившегося значения потока и уменьшение скорости его изменения во времени [27].

При постоянной частоте питающей сети управление величиной тока намагничивания и, следовательно, создаваемого им магнитного потока реализуется воздействием на приложенное к двигателю напряжение. Первый способ управления сводится к ступенчатой подаче напряжения путем детерминированного пофазного включения обмоток статора для создания необходимых ненулевых начальных электромагнитных условий, второй —

к изменению величины напряжения, приложенного к статору двигателя; третий — к воздействию на скорость изменения величины этого напряжения [1, 27].

Коэффициенты затухания свободной составляющей потока зависят от параметров двигателя и его скорости вращения [1]. Чем больше активное сопротивление цепей статора и ротора, тем больше коэффициент затухания и быстрее затухает электромагнитный переходный момент. Чем медленнее скорость вращения двигателя, тем меньше коэффициенты затухания.

С ростом скорости вращения ротора коэффициенты затухания увеличиваются и ускоряется затухание переходного электромагнитного момента.

Возбуждение режимов противотокового и динамического торможения производится обычно от независимой сети переменного тока. В обоих случаях тормозной процесс характеризуется наличием вынужденных составляющих намагничивающего тока и потока, что определяет появление знакопеременных электромагнитных переходных моментов. Торможение обычно начинается при ненулевых начальных условиях, определяемых мгновенными значениями питающего напряжения и параметрами электропривода. По этой причине свободная составляющая потока и, следовательно, переходные моменты могут достигать значительной величины, поэтому основная задача управления динамикой этих тормозных режимов заключается в ограничении пиков переходных моментов.

При конденсаторном и магнитном торможении вынужденные составляющие тока намагничивания и магнитного потока отсутствуют. Переходный момент знака не меняет и действует при конденсаторном торможении согласованно с основным тормозным моментом. Задача управления заключается как в ограничении величины переходного момента, так и в формировании суммарного тормозного момента.

При магнитном торможении весь тормозной эффект определяется электромагнитным переходным моментом, возникающим из-за быстрого затухания магнитного потока отключенного от питающей сети асинхронного двигателя с замкнутой цепью статора для рассеяния преобразованной электрической энергии.

Соответственно изменению характера и роли переходного момента меняется и задача управления, которая теперь заключается главным образом в формировании этого момента с целью оптимизации режима для повышения эффективности торможения. Необходимо увеличивать, а не уменьшать величину установившегося значения магнитного потока и его производных.

Во всех комбинированных способах торможения совмещаются режимы с ненулевыми начальными условиями, поэтому в

этих режимах особенно велико влияние электромагнитных переходных моментов, которые часто полностью определяют характер всего тормозного процесса. Здесь особенно важным оказывается формирование оптимальной динамической характеристики с ограничением пиков переходных моментов, без чего невозможно в большинстве случаев получить высокую эффективность торможения. Способы решения этой задачи зависят в значительной степени от конкретных схемных решений, выбор которых связан с управлением динамикой режима. Особенно сложной и своеобразной оказывается физика режимов динамического торможения при тиристорном управлении величиной возбуждающего тока.

При быстром изменении вращения скорости (скольжения) асинхронного двигателя в его роторе наводится ЭДС, связанная с изменением величины токов ротора, определяемой величиной скольжения; и тем большая, чем больше это изменение. Наводимая ЭДС стремится препятствовать изменению величины токов. Вследствие этого возникает рассогласование между фактической величиной роторных токов и величиной, которая должна иметь место при данной величине скольжения. Это явление особенно сказывается в зонах, где небольшому изменению скорости соответствует значительное изменение величины токов, как, например, это имеет место в зоне малых скольжений при двигательном режиме.

Динамическая характеристика показывает, что при синхронной скорости ($s=0$) двигатель развивает вращающий момент и, следовательно, токи в роторе не равны нулю, как это имеет место в установившемся режиме. Этот переходный вращающий момент разгоняет двигатель до скорости выше синхронной. При отрицательном скольжении возникает тормозной момент, под действием которого происходит замедление привода. Однако и здесь из-за действия переходных токов и момента двигатель проходит положение равновесия, которое достигается только после нескольких колебаний. Чем меньше момент инерции привода и больше соответственно величина его ускорения при подходе к синхронной скорости, тем больше размах колебаний и их число. Статический момент нагрузки оказывает, естественно, демпфирующее действие. Аналогичное явление может иметь место и при динамическом торможении.

Приведенные соображения показывают общие пути учета влияния электромагнитных переходных явлений на динамические характеристики режимов торможения асинхронных электроприводов. Конструирование рациональных тормозных устройств для эффективного торможения подвижных элементов станков возможно только при учете особенностей динамических характеристик конкретных тормозных режимов. При анализе таких характеристик практически всех способов торможения приходится сталкиваться с эффектом магнитного торможения.

При работе асинхронного двигателя его магнитный поток вращается в пространстве с синхронной скоростью. После отключения двигателя от сети магнитный поток не исчезает мгновенно, но сцепляется с замкнутой обмоткой ротора и вращается в пространстве вместе с ним. Амплитуда потока, величина и частота ЭДС, наводимой этим затухающим потоком в обмотках статора, постепенно уменьшаются. Если в цепи статора образовать замкнутый контур, то возникшие в нем под действием наведенной затухающей ЭДС свободные токи будут препятствовать вращению потока и его скорость вращения станет меньше скорости вращения ротора. Скорость вращения магнитного потока будет зависеть теперь как от скорости вращения ротора, так и от параметров замкнутых контуров статора и ротора. Вследствие изменения положения оси магнитного потока относительно осей замкнутых контуров обмоток статора и ротора наводимые в них токи препятствуют этому изменению, создавая тормозящий ротор двигателя момент до тех пор, пока магнитный поток машины не затухнет полностью.

Этот своеобразный кратковременный генераторный режим асинхронной машины возбуждается за счет энергии остаточного затухающего магнитного поля. Время затухания потока и, следовательно, существования тормозного режима определяется его начальной величиной и параметрами замкнутых контуров. Величина кинетической энергии вращающихся масс, преобразующаяся в электрическую и рассеиваемая в замкнутых контурах, имеет конечное значение, но значительно превышает величину энергии, запасаемой магнитным полем двигателя.

Такое магнитное торможение (МТ) может быть использовано как самостоятельно для станочных малоинерционных приводов с двигателями небольшой мощности, так и в качестве составной части многих комбинированных способов эффективного торможения. Особая важность МТ состоит в том, что оно проявляется при любом способе электрического торможения, которое начинается при незатухшем остаточном магнитном поле двигателя, что практически всегда имеет место при использовании современной быстродействующей коммутационной станочной аппаратуры. Поэтому действие МТ должно учитываться при анализе тормозных режимов и конструировании рациональных тормозных устройств. Остановимся на основных свойствах МТ и способах его реализации.

Достоверный качественный и количественный анализ такого электромеханического переходного процесса возможен путем решения нелинейных дифференциальных уравнений математической модели асинхронного двигателя в этом режиме с помощью ЭВМ [10]. Анализ и многочисленные эксперименты позволили установить, что пик тормозного момента является квад-

ратичной функцией начальной величины магнитного потока и зависит от коэффициентов затухания потока. Поскольку с ростом мощности двигателя коэффициенты затухания уменьшаются, то относительная величина пиков тормозного момента возрастает. У шестиполюсных двигателей коэффициенты затухания больше, чем у четырехполюсных, и соответственно меньше пики момента. При увеличении активного сопротивления статорной цепи коэффициенты затухания увеличиваются и пики тормозного момента уменьшаются.

Величина кинетической энергии вращающихся масс привода, поглощаемая в процессе торможения, и соответственно снижение скорости привода, характеризующие торможение, пропорциональны квадрату начальной величины магнитного потока и зависят прежде всего от индуктивных сопротивлений рассеяния замкнутых контуров статора и ротора. Изменение активных сопротивлений этих контуров в достаточно широких пределах мало влияет на эффект торможения, который зависит главным образом от соотношения между величинами энергий, запасаемых соответственно вращающимися массами привода и магнитным полем двигателя. С ростом мощности двигателя энергия, запасаемая магнитным полем, растет медленнее, чем момент инерции ротора и, следовательно, величина кинетической энергии, поэтому эффект торможения с увеличением мощности двигателя уменьшается. Аналогично уменьшится эффективность данного способа торможения с увеличением числа полюсов двигателя.

Типичная осциллограмма изменения скорости ω_r , тока статора I и тормозного момента M в процессе магнитного торможения, реализуемого симметричным коротким замыканием статорных обмоток двигателя при номинальной величине магнитного потока, представлена на рис. 4, а. Исследования показывают, что при номинальном напряжении на зажимах двигателя в момент короткого замыкания пики моментов в среднем составляют 4—5 M_H для шестиполюсных и 6—7 M_H для четырехполюсных двигателей. Пики тормозного момента достигают максимума в течение первого полупериода после замыкания обмоток и вызывают интенсивное снижение скорости, которое продолжается 0,02—0,06 с независимо от мощности и инерционности привода. Тормозной путь весьма мал и для вала двигателя составляет доли оборота. Пики тормозного момента относительно больше пиков тока.

Осциллограмма, полученная при замыкании статора двигателя на резистор с сопротивлением $0,18 R_H$ в каждой фазе (рис. 4, б), иллюстрирует высказанные выше соображения о влиянии сопротивления статорной цепи на процесс торможения. Обе осциллограммы сняты при одинаковой начальной величине магнитного потока двигателя, работавшего холостую с добавочным моментом инерции, равным 0,4 момента ротора. Зависи-

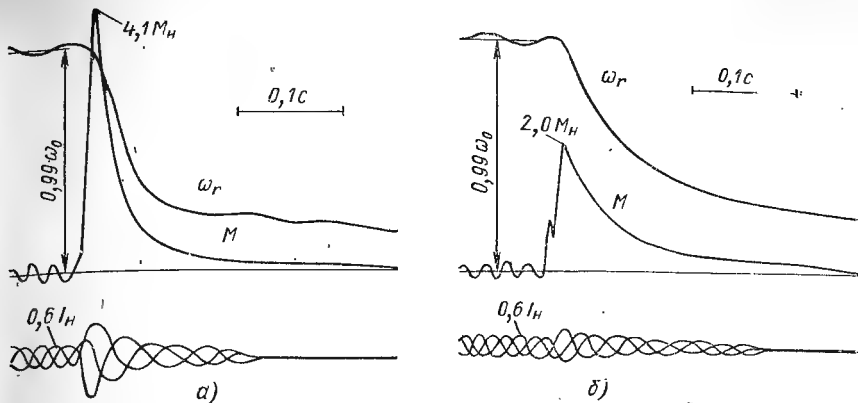


Рис. 4. Осциллограммы магнитного торможения асинхронного двигателя АО2-31-6 коротким замыканием статорной цепи (а) и замыканием на резистор (б) с сопротивлением $0,18 R_n$

мость снижения скорости от сопротивления добавочных резисторов в цепи статора носит экстремальный характер. Оптимальная величина сопротивления, при которой пик тормозного момента уменьшается в 2—3 раза без уменьшения величины снижения скорости и, следовательно, тормозного эффекта, изменяется от двух- до пятикратного значения сопротивления фазы статорной обмотки ($R=2\div 5 r_s$).

Для четырехполюсных двигателей первого габарита возможно поглощение всей кинетической энергии, запасенной ротором вращающегося вхолостую двигателя. С увеличением мощности двигателей эффективность торможения уменьшается. Однако, даже у двигателей мощностью 7,5—10 кВт возможно поглощение до 60% кинетической энергии. Можно считать, что у четырехполюсных двигателей мощностью 1,5—3 кВт поглощается до 0,85 кинетической энергии, у двигателей 4—5,5 кВт — до 0,75. Для шестиполюсных двигателей эти величины следует уменьшить в 1,5 раза.

Величина кинетической энергии, поглощаемой при торможении данного двигателя, практически не зависит от инерционных масс привода, поэтому с увеличением момента инерции привода растет скорость, при которой прекращается торможение. При постоянстве величины поглощаемой при торможении данного двигателя кинетической энергии ΔW_m угловая скорость, при которой прекращается торможение, зависит от суммарной величины приведенного момента инерции J_Σ привода:

$$\omega_{rT} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{2\Delta W_m}{J_\Sigma}}, \quad (1)$$

где ω_0 — синхронная угловая скорость вращения магнитного поля двигателя.

Для увеличения эффективности торможения необходимо увеличивать начальную величину магнитного потока, что достигается значительным повышением напряжения на зажимах двигателя перед замыканием его обмоток с помощью кратковременного переключения их со звезды на треугольник, что значительно проще, последовательным или параллельным подключением конденсаторов. Снижение напряжения на зажимах двигателя перед торможением вызывает соответственно уменьшение его эффективности. Однако из-за насыщения магнитной цепи двигателя при номинальном напряжении уменьшение напряжения, например для двигателей единой серии, на 5—8% не вызывает заметного изменения магнитного потока и практически не снижает эффект торможения. Поэтому интервал времени от момента отключения двигателя от сети до момента замыкания цепи статора не должен превышать величины, в течение которой остаточное напряжение на обмотках статора станет меньше 0,9 номинального.

Магнитное торможение — наиболее экономичный способ, поскольку он осуществляется без потребления энергии из сети. Потери в двигателе при таком способе торможения меньше, чем при любом другом, поскольку в тепло превращается только поглощаемая часть кинетической энергии движущихся масс привода. Преобразованная энергия передается в основном в цепь статора и превращается в тепло в добавочных резисторах, поэтому велико и допустимое число торможений в единицу времени.

Наиболее простые схемы реализации магнитного торможения приведены на рис. 5. При применении быстродействующей аппаратуры возможно использование отдельного тормозного контактора T с замыкающими контактами (рис. 5, а). Если тормозной контактор может оставаться включенным в течение всего времени отключения двигателя, то схема управления оказывается наиболее простой (рис. 5, в). Если контактор T должен отключаться после окончания торможения, то может быть использована схема управления с выдержкой времени реле PT порядка 0,1 с (рис. 5, г).

Для повышения напряжения на зажимах двигателя до замыкания обмоток статора и, следовательно, увеличения эффективности торможения можно применять схему с конденсаторами (рис. 5, б). При отключении контактора L последовательно с обмотками статора оказываются включенными конденсаторы C , вследствие чего напряжение на обмотках статора двигателя возрастает. После замыкания контактора T происходит торможение, характер которого не отличается от показанного на осциллограмме рис. 4, а, но с большим пиком тормозного момента и соответственно большим снижением скорости. Ток из сети ограничивается конденсаторами. Для повышения напряжения на 20—30% сверх номинального емкость конденсаторов должна

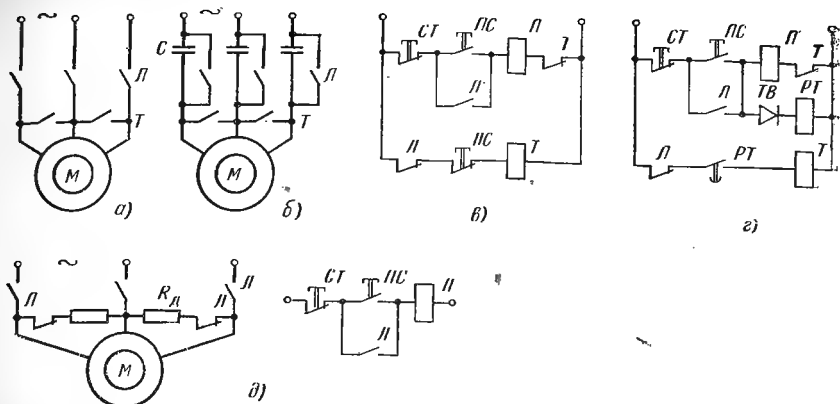


Рис. 5. Схемы магнитного торможения с предварительным отключением двигателя от сети

быть в 4—5 раз больше номинальной. Схемы управления можно применять те же, что и в предыдущем случае.

Для приводов малой мощности можно рекомендовать схему с размыкающими контактами линейного контактора (рис. 5, д), последовательно с которыми при использовании быстродействующей аппаратуры включают резисторы R_d , ограничивающие ток кратковременного короткого замыкания, который может возникнуть, если размыкающие контакты замкнутся до того, как прекратится ток через главные замыкающие. Сопротивления резисторов можно выбирать равными сопротивлению короткого замыкания двигателя или пятикратной величине активного сопротивления фазы статорной обмотки.

Для двигателей большей мощности может быть рекомендована схема с токоограничивающим резистором (рис. 6) [16]. Изменяя сопротивление резистора R_T , можно ограничить ток из сети при замыкании обмоток статора любым заранее заданным значением. Однако при этом напряжение на зажимах двигателя перед коротким замыканием должно быть не менее 0,9 номинального. В большинстве случаев двигатели отключаются на холостом ходу, поэтому сопротивление резистора

$$R_T = \frac{0,1 U_H}{\sqrt{3} I_{0H}} \text{ Ом,} \quad (2)$$

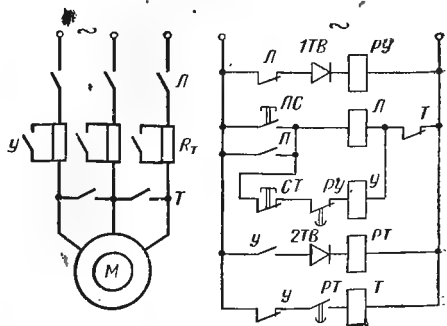


Рис. 6. Схема магнитного торможения с токоограничивающим резистором

где $I_{он}$ — номинальный линейный ток холостого хода.

В большинстве случаев для двигателей единой серии сопротивление R_T можно принимать равным сопротивлению Z_K короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_H}{\sqrt{3} I_H} \text{ Ом}, \quad (3)$$

где I_H — пусковой ток двигателя.

Схему с токоограничивающим резистором рационально применять, если резистор используется для ограничения токов и при пуске, что предусмотрено схемой управления. До включения двигателя к сети подключено электромагнитное реле времени PY . При нажатии кнопки $ПС$ включается контактор $Л$, подключающий к сети двигатель через резистор. С выдержкой времени, определяемой реле PY , резистор шунтируется контактором $У$. Одновременно включается второе реле времени $РТ$, подготавливающее цепь включения контактора $Т$. При нажатии кнопки $СТ$ выпадает контактор $У$, вводит в цепь статора резистор и включает тормозной контактор $Т$, который закорачивает статор двигателя и отключает своим блок-контактом контактор $Л$. Реле $РТ$ с небольшой выдержкой времени после окончания торможения отключает контактор $Т$. При торможении по этим схемам характер процесса соответствует осциллограмме на рис. 4, а.

При прямом пуске двигателей магнитное торможение более просто реализуется по схемам с разрядными резисторами (рис. 7) [13]. Сопротивление разрядного резистора выбирают равным оптимальной величине. При пуске двигателя кроме контактора $Л$ включается реле времени $РТ$, управляющее контактором $Т$. При нажатии кнопки $СТ$ промежуточное реле $РП$ включает контактор $Т$, который подключает к статору двигателя разрядные резисторы и отключает своим блок-контактом контактор $Л$. Двигатель вместе с резисторами отключается от сети. Происходит процесс торможения, аналогичный показанному на осциллограмме рис. 4, б, и двигатель интенсивно снижает скорость. После окончания торможения реле $РТ$ отключает контактор $Т$. Применение магнитного торможения наиболее

рационально в сочетании с динамическим и конденсаторным. В этом случае приведенные выше силовые схемы оказываются компонентами соответствующих тормозных устройств.

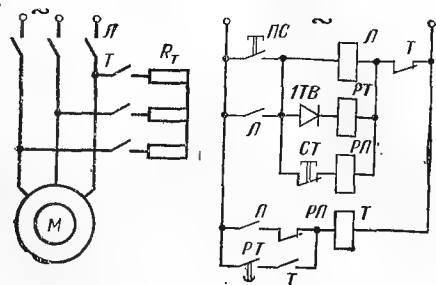


Рис. 7. Схема магнитного торможения с разрядным резистором

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ И ДИНАМИЧЕСКОГО

ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ

Торможение противовключением (противотоковое) является одним из двух наиболее давно применяемых способов электрического торможения станочных электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Это торможение эффективно с большой средней величиной тормозного момента, но не обеспечивает надежной и точной остановки привода из-за возможности реверса. Значительный расход энергии и повышенный нагрев двигателя ограничивают допустимое число торможений в единицу времени. Существенное влияние оказывают знакопеременные переходные моменты, достигающие значительной величины и вызывающие повышенный износ двигателя и приводаемого механизма.

При противотоковом торможении для остановки двигателя необходимо его автоматическое отключение от сети при скорости, близкой к нулю. Для контроля скорости и получения необходимого сигнала в станочных приводах применяют реле контроля скорости типа РКС или РКС-М, а также бесконтактные датчики скорости типа УБТ, соединяемые с валом электродвигателя [22, 26].

Индукционное реле типа РКС-М имеет две пары контактов, каждая из которых состоит из размыкающего и замыкающего контактов с общей точкой. При неподвижном вале реле обе пары контактов находятся в исходном положении. При некоторой скорости вала происходит срабатывание одной из пар контактов, соответствующей данному направлению вращения. Устройство типа УБТ состоит из бесконтактного индукторного датчика скорости, сопрягаемого с валом двигателя переходной втулкой, и полупроводникового усилителя, на выход которого включаются одно или два исполнительных электромагнитных реле. При некоторой небольшой скорости вала, величина которой задается настройкой усилителя, срабатывает одно из исполнительных реле соответственно заданному направлению вращения. В зависимости от того, применяют ли реле РКС или устройства УБТ, несколько изменяются схемы управления. Силовая часть схем остается неизменной. Наиболее распространенные

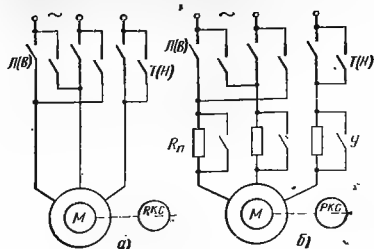


Рис. 8. Схемы противотокового торможения прямого (а) и с токоограничивающими резисторами (б)

схемы включения силовых цепей двигателя для реализации прямого пуска и противотокового торможения, а также пуска и торможения с токоограничивающим резистором для уменьшения

величины пускового и тормозного токов приведены на рис. 8.

Типичные схемы управления пуском и противотоковым торможением представлены на рис. 9. Наиболее простая схема (рис. 9, а) предназначена для приводов с одним направлением вращения при прямом пуске и торможении по силовой схеме, приведенной на рис. 8, а. При нажатии кнопки выпадает контактор Л, который отключает двигатель от сети и включает контактор Т, подающий на обмотки двигателя напряжение с обратным порядком следования фаз. Когда под действием тормозного момента частота вращения двигателя уменьшится до 200—250 об/мин, замыкающий контакт РКС реле контроля скорости размыкается, отключая контактор Т и прекращая торможение. Схема на рис. 9, б предназначена для управления пуском и торможением двигателей одностороннего вращения с токоограничивающими резисторами, включенными по силовой схеме на рис. 8, б. Обе схемы управления нельзя применять в тех случаях, когда существует возможность проворота вала электродвигателя непосредственно от руки или через кинематические цепи привода, поскольку в этом случае может замкнуться контакт РКС контактором Т и кратковременно включится двигатель.

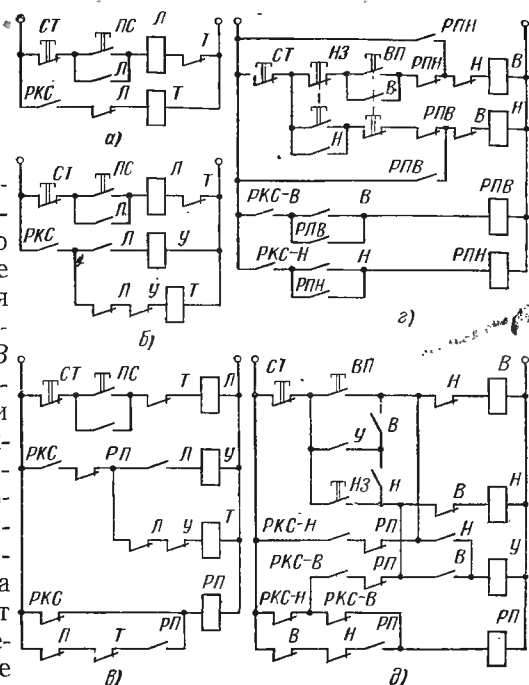
Для предотвращения самовключения двигателя при провороте его вала необходимо вводить запретительные блокировки с помощью промежуточного реле РП (рис. 9, в). Реле РП включено при неподвижном двигателе и своим размыкающим контактом разрывает цепь питания тормозного контактора Т, чем исключается его включение при замыкании замыкающего контакта РКС, если двигатель отключен от сети.

Для приводов с двумя направлениями вращения могут быть рекомендованы схемы рис. 9, г, д. Первую из них применяют для управления прямым пуском, реверсом и торможением двигателей, включаемых по силовой схеме на рис. 8, а. В этом случае контакторы направления соответственно называются В и Н. Пуск и реверс производится нажатием на кнопки ВП или НЗ. Для торможения нажимают кнопку СТ, которая отключает включенный до этого контактор В или Н. Во время вращения двигателя контактами реле контроля скорости, соответ-

Рис. 9. Схемы управления двигателями при контроле противотокового торможения реле РКС

вующими данному направлению вращения, например *РКС-В*, было включено промежуточное реле этого направления *РПВ*, поэтому после отключения контактора *В* через замкнутые замыкающий контакт *РПВ* и размыкающий блок-контакт *В* включается контактор противоположного направления *Н*. Торможение будет продолжаться до тех пор, пока не разомкнется контакт *РКС-В* и не выпадет реле *РПВ*, отключающее контактор *Н*. Реле *РПВ* и *РПН* предотвращают также включение отключенного двигателя при провороте его вала.

По схеме рис. 9, *г* выполняются аналогичные функции при использовании при пуске и торможении токоограничивающих резисторов, собранных по силовой схеме на рис. 8, *б*. Отличие данной схемы управления в том, что реверс производится с промежуточной остановкой, для чего нужно сначала нажать кнопку *СТ*, и только после окончания противотокового торможения можно пускать двигатель в другую сторону, нажимая на соответствующую кнопку *ВП* или *НЗ*. Пусковые кнопки нужно держать нажатыми, пока не включится контактор *У*, шунтирующий токоограничивающие резисторы. Управление контактором *У* производится в функции скорости контакторами *РКС-Н* или *РКС-В* в зависимости от направления вращения двигателя. При использовании замыкающего и размыкающего контактов реле *РКС* одного направления необходимо учитывать, что они имеют общую точку. В схеме возможно применение одного промежуточного реле *РП*, выполняющего только функцию защиты от самовключения двигателя при повороте его вала. Торможение двигателя при нажатии кнопки *СТ* производится, как и в предыдущей схеме, включением контакторов противоположного направления, которое реализуется и контролируется непосред-



разомкнутом блок-контакте L не включится. Схема на рис. 10, б аналогична схеме на рис. 9, д и предназначена для управления двигателем с двумя направлениями вращения и включением токоограничивающих резисторов при пуске и торможении. При нажатии, например, кнопки $ВП$ контактор $В$ срабатывает и включает двигатель в заданном направлении. Одновременно замыкающим и размыкающим блок-контактами $В$ в цепях усилителя подготавливается цепь включения реле $1P$, которое срабатывает и самоблокируется при заданной частоте вращения вала двигателя. После включения $1P$ включается контактор $У$, шунтирующий токоограничивающие резисторы. При нажатии кнопки $СТ$ выпадают контакторы $В$ и $У$, после чего через замкнутый контакт $1P$ включается контактор $Н$. Двигатель тормозится до тех пор, пока при близкой к нулю частоте вращения не выпадет реле $1P$, отключающее контактор $Н$ и возвращающее схему управления в исходное состояние готовности к новому запуску двигателя.

Электромагнитные переходные процессы оказывают значительное влияние на динамику противотокового торможения, так как возникающие переходные моменты достигают особенно больших величин. Последнее обусловлено наличием в большинстве случаев в момент коммутации остаточного незатухшего магнитного потока двигателя. В зависимости от величины и особенно фазы вектора этого потока относительно потока, создаваемого в двигателе в момент включения системой питающих напряжений, может изменяться в широких пределах скорость приращения магнитного потока и соответственно величина аперiodической составляющей тока намагничивания, определяющая образование свободных составляющих переходного момента. Если подключение двигателя к сети произойдет в момент, когда величина и фаза затухающего остаточного потока будут соответствовать величине и фазе вынужденного потока, то переходные составляющие момента будут минимальны. При расхождении этих величин переходный момент растет и может достигать больших значений. При одной и той же величине остаточного потока величины переходных моментов могут иметь резко отличные значения только за счет его фазы.

Осциллограммы реверса на холостом ходу двигателя АО2-31-4 с суммарным приведенным моментом инерции привода, равным 1,85 момента инерции ротора, и статическим моментом, составляющим 0,1 M_H , приведенные на рис. 11, сняты для реверса с незатухшим остаточным магнитным полем. Осциллограмма на рис. 11, а соответствует благоприятному моменту включения, а осциллограмма и на рис. 11, б — включению, когда фазы потоков не совпадают. Если реверс производится при нулевых начальных условиях с полностью затухшим остаточным полем, то пики переходного момента имеют стабильную

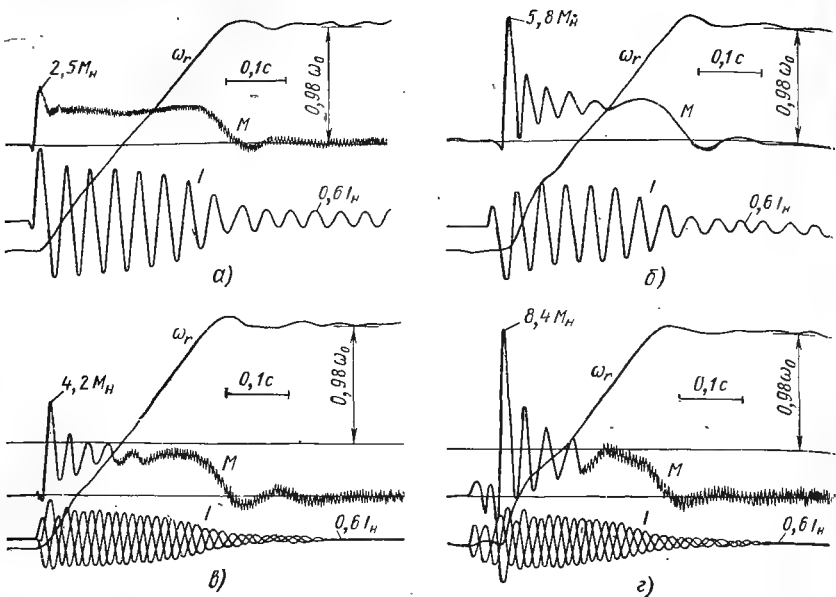


Рис. 11. Осциллограммы реверса двигателя АО2-31-4 при различных начальных электромагнитных условиях

величину 4—5 M_H (рис. 11, в). Существенное влияние на величину переходного момента оказывает неодновременное включение контактов, создающее ненулевые начальные условия, что приводит (рис. 11, г) к результатам, аналогичным наличию остаточного магнитного поля.

Наиболее вероятными являются начальные пики момента, равные 5—6 M_H . Возможны и пики, достигающие до 10—12 M_H , особенно при неодновременном замыкании контактов. Пульсации переходного момента затухают значительно медленнее, чем при пуске. Преобладают положительные (тормозные) составляющие, которые заметно увеличивают среднее значение тормозного момента и интенсивность торможения, поэтому для малоинерционных станочных приводов за счет переходного момента время торможения уменьшается примерно на 20%, а тормозной путь из-за резкого снижения скорости в начале торможения примерно на 30%. С ростом мощности двигателей увеличивается кратность возможного пика момента, который у двигателей мощностью свыше 15 кВт может достигать 15 M_H . При увеличении момента инерции привода его скорость изменяется медленнее, поэтому переходная составляющая момента затухает также медленнее и число колебаний момента возрастает. Соответственно увеличивается число ударов в кинематической цепи привода. Вместе с тем уменьшается влияние переходного момента на время и путь торможения. Для инерцион-

ных приводов определение времени и пути торможения может производиться по статической механической характеристике.

Ограничение переходных моментов возможно путем гашения остаточного магнитного поля перед началом торможения и регулировкой контактов для их одновременного включения, что практически трудно реализуемо. Полное подавление переходных моментов возможно только с помощью быстродействующих тиристорных коммутаторов [1]. При этом значительно улучшается динамика торможения, повышаются его стабильность и точность, снижаются удары и перегрузки в кинематических цепях. Вместе с тем несколько снижается интенсивность торможения.

Наиболее существенным недостатком противотокового торможения являются большие потери энергии, значительно превышающие потери при других способах торможения. Обычно торможение производится на холостом ходу, и влиянием статического момента на процесс торможения можно пренебречь. В этом случае потери энергии в роторе двигателя за время торможения

$$W_r = 3J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \text{ Дж}, \quad (4)$$

где J_{Σ} — суммарный приведенный момент инерции привода.

Если пренебречь величиной тока намагничивая, малой по сравнению с величиной тока статора, что для данного режима вполне допустимо, то потери в статоре

$$W_s = W_r B \frac{r_s}{r_r} \text{ Дж}, \quad (5)$$

где B — коэффициент, зависящий от формы пазов ротора. Для двигателей мощностью до 0,6 кВт его можно принимать равным 1, а для более мощных (в зависимости от формы паза ротора) он доходит до 0,4—0,5.

Суммарные потери в двигателе изменяются, следовательно, в пределах от четырех- до шестикратной величины кинетической энергии, запасаемой вращающимися с синхронной скоростью массами привода. Эти потери в 2,5—3 раза превышают потери при пуске. Соответственно уменьшается и число включений двигателя, допустимое по условиям нагрева, в единицу времени.

Существенное уменьшение величины потерь может быть достигнуто при совмещении противотокового торможения с каким-либо другим способом, снижающим угловую скорость в начале торможения. Для малоинерционных приводов малой мощности таким способом торможения может быть магнитное. Если, например, в этом случае противотоковое торможение начнется со скорости, равной даже $0,5 \omega_0$, то потери уменьшаются

примерно в 4 раза. Однако реализация магнитно-противотокового торможения (МПТ) затруднительна, поскольку в схему управления необходимо ввести соответствующие элементы, значительно ее усложняющие и требующие тщательной настройки и регулировки контактов. Более просто реализуется конденсаторно-противотоковое торможение (КПТ) путем глухого симметричного подключения конденсаторов к статору двигателя без добавочных коммутирующих аппаратов. В этом случае значительно улучшается динамика торможения за счет резкого уменьшения влияния электромагнитных переходных моментов.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

При подключении к статорной обмотке отключенного от сети, но с вращающимся по инерции ротором асинхронного двигателя источника постоянного или выпрямленного напряжения создается неподвижное в пространстве магнитное поле, которое возбуждает генераторный режим, наводя в обмотке ротора ЭДС и токи, взаимодействующие с вызвавшим их магнитным потоком и создающие тормозной момент. Такое торможение получило название динамического, и его широко применяют в электроприводе станков.

Динамическое торможение весьма экономично, поскольку потери энергии в роторе двигателя за время торможения вхолостую

$$W_r = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \text{ Дж}, \quad (6)$$

а потери в статоре для основных, наиболее распространенных схем включения возбуждающего тока

$$W_s = W_r B \frac{r_s}{r_r} \text{ Дж}. \quad (7)$$

Поэтому суммарные потери примерно в 3 раза меньше и соответственно больше допустимое по нагреву число торможений в единицу времени.

Рассмотрим влияние электромагнитных переходных явлений на процесс торможения.

Типичные статическая и динамическая механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя, приведенные на рис. 12, показывают существенное влияние электромагнитного переходного момента на режим динамического торможения. В начале торможения при высокой скорости ротора на статическую характеристику накладываются знакопеременные затухающие моменты, обусловленные как коммутационными явлениями, так и начальными электромагнитными условиями.

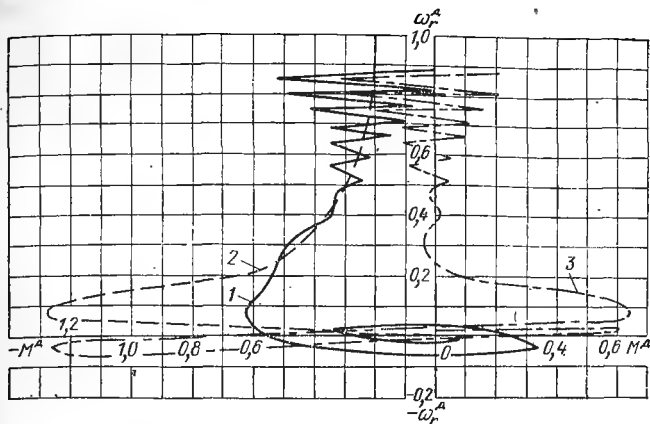


Рис. 12. Механические характеристики двигателя АО2-31-4 при динамическом торможении:

1, 2 — динамическая и статическая характеристики; 3 — электромагнитный переходный момент

При нулевых начальных условиях в момент подключения обмотки статора к источнику постоянного тока возникает неподвижный в пространстве магнитный поток, сцепленный с этой обмоткой. Вместе с ним возникает и сцепленный с ротором, вращающийся вместе с ним в пространстве затухающий магнитный поток, образованный апериодической составляющей тока, наведенного в роторе магнитным потоком статора. Взаимодействие этих потоков образует соответственно затухающий знакопеременный момент. Начальная величина этого переходного момента, обусловленного включением возбуждающего тока, соизмерима с установившимся значением тормозного момента при данной скорости, а затухание происходит с коэффициентом затухания цепи ротора, также зависящим от скорости. Поскольку включение постоянного тока происходит при высокой скорости, то переходный момент невелик, быстро затухает и не оказывает существенного влияния на тормозной процесс.

При ненулевых начальных условиях, когда к моменту подачи в статор возбуждающего тока переходная составляющая тока ротора и связанный с ней магнитный поток, вызванные предшествующим отключением двигателя от сети переменного тока, не успели затухнуть, возникает составляющая переходного момента, подобная переходному моменту магнитного торможения, поскольку обмотка статора замкнута на источник возбуждающего тока. Кроме того, возникает и составляющая, обусловленная взаимодействием затухающего потока ротора с неподвижным в пространстве возбужденным магнитным потоком. Обе составляющие создают знакопеременный затухающий

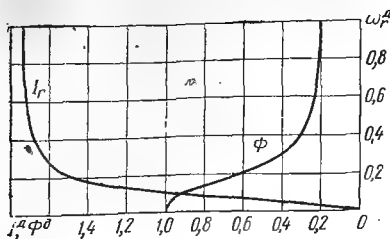


Рис. 13. Кривые изменения потока Φ и тока ротора I_r при динамическом торможении асинхронного двигателя

переходный момент, частота пульсаций которого определяется угловой скоростью ротора и уменьшается по мере ее снижения. В зависимости от параметров обмоток, сопротивления цепи статора, включая источник возбуждающего тока, и характера этого источника преобладающее влияние могут иметь первая или вторая составляющие момента. При малом сопротивлении цепи статора основное влияние оказывает первая составляющая, поскольку пик переходного момента приближается к пику момента при коротком замыкании цепи статора и может достигнуть 4—6 M_H .

В конце торможения в зоне низких скоростей привода возникает переходный процесс, обусловленный быстрым изменением энергии магнитного поля, которое вызывается резким изменением скорости вращения двигателя под действием тормозного момента. Из-за того что магнитное поле создается постоянным током, размагничивающее действие токов статора не компенсируется, как это имеет место при питании асинхронного двигателя от сети переменного тока, и изменяется результирующий магнитный поток (рис. 13).

В зоне высоких частот вращения поток меняется мало, и поэтому переходный момент, обусловленный изменением энергии магнитного поля, не проявляется. В отличие от этого в зоне низких скоростей вращения даже небольшому изменению скорости соответствует значительное изменение величины магнитного потока. Поэтому в обмотках двигателя будут наводиться переходные токи, препятствующие изменению величины магнитного потока. В результате их действия мгновенные значения потока, тока ротора и момента двигателя будут отставать в своем изменении от установившихся значений, соответствующих данной скорости вращения. Поэтому фактический максимальный критический момент оказывается значительно меньше величины, определяемой по статической характеристике. При скорости вращения, равной нулю, токи и момент по этой же причине не будут равны нулю, и, следовательно, ротор начнет вращаться в противоположном направлении. Момент двигателя станет равным нулю при некоторой отрицательной величине скорости вращения, из-за чего также возникнет момент другого знака и начинаются колебания момента и скорости враще-

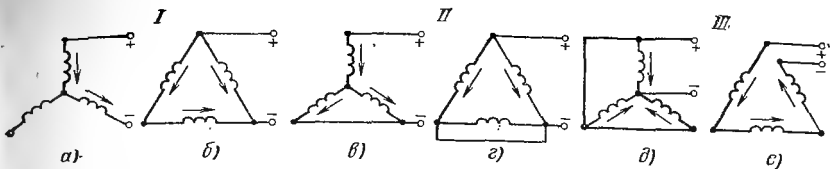


Рис. 14. Группы схем включения обмоток статора асинхронных двигателей при динамическом торможении

ния двигателя вокруг нулевой точки. Эти колебания будут тем больше, чем быстрее изменяется скорость вращения. Следовательно, чем меньше величина момента инерции привода и чем больше величина возбуждающего тока, тем больше будут относительное уменьшение максимального значения тормозного момента и колебания ротора. Эта общая картина процесса торможения заметно меняется в зависимости от схемы включения обмоток статора, параметров привода и тормозного устройства.

По характеру переходных процессов все схемы включения обмоток статора могут быть разбиты на три группы (рис. 14). К первой группе относятся наиболее простые и распространенные схемы рис. 14, а, б, ко второй группе схемы на рис. 14, в, г, имеющие дополнительные короткозамкнутые контуры к третьей группе так называемые симметричные схемы (рис. 14, д, е), создающие только третью и кратные трем пространственные гармонические составляющие магнитодвижей силы. Схемы первой и второй групп третьих гармоник магнитодвижей силы практически не создают.

Рассмотренные выше переходные процессы справедливы при включении обмоток двигателя по схемам первой группы. На рис. 15 представлены осциллограммы тормозного процесса при подключении обмоток двигателя по схеме на рис. 14, а к источнику постоянного напряжения с большим добавочным сопротивлением, ограничивающим возбуждающий ток величиной $1,22 I_{H} \approx 2 I_{OH}$. Осциллограммы иллюстрируют общий характер переходного процесса и влияние на него остаточного затухающего магнитного поля ротора, а также характер источника питания. Наличие остаточного поля характеризуется величиной ЭДС E_1 статорной обмотки.

Переходные моменты зависят от сопротивления статорной цепи, включая источник возбуждающего тока, поэтому односторонняя проводимость этой цепи при питании статорных обмоток от выпрямителя увеличивает пики переходного момента от замыкания статорной цепи (пики магнитного торможения) и ускоряет их затухание (рис. 15, в). Переходные моменты искажаются также за счет наложения пульсаций питающего напряжения, которые проявляются и после окончания электромаг-

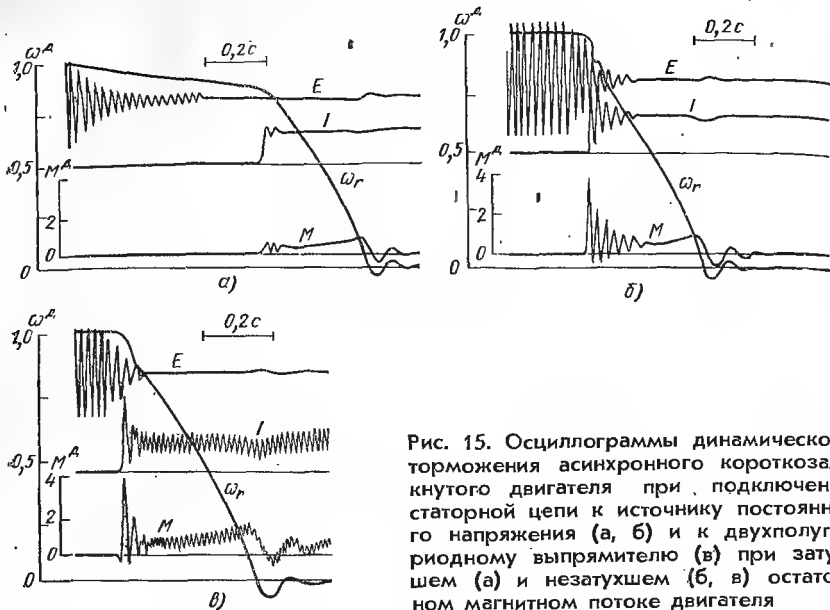


Рис. 15. Осциллограммы динамического торможения асинхронного короткозамкнутого двигателя при подключении статорной цепи к источнику постоянного напряжения (а, б) и к двухполупериодному выпрямителю (в) при затухшем (а) и незатухшем (б, в) остаточном магнитном потоке двигателя

нитного переходного процесса, вызывая пульсации возбуждающего тока и соответственно тормозного момента.

Наличие в цепи статора короткозамкнутого контура, что является характерной особенностью схем второй группы, увеличивает демпфирующее действие обмоток и резко изменяет характер переходного процесса. В начале торможения при ненулевых начальных условиях преобладает составляющая переходного момента, обусловленная эффектом магнитного торможения, что вызывает быстрое затухание остаточного потока ротора и малое проявление второй составляющей от взаимодействия этого поля с вынужденным потоком статора. В малоинерционных приводах происходит почти мгновенный сброс скорости и затем более медленное ее снижение под действием установившегося тормозного момента. Поэтому фактическая величина максимального тормозного момента при низкой скорости меньше отличается от его величины по статической характеристике. Демпфируется и переходный процесс в конце торможения. Как правило, имеет место только один переход через нулевое значение скорости.

В схемах третьей группы из-за ослабления главного потока, имеющего теперь утроенное число пар полюсов, и усиления потоков рассеяния переходные моменты как в начале, так и в конце торможения малы и различие между статической и динамической характеристиками незначительно. Определение пути и времени торможения в этом случае даже для малоинерцион-

ных приводов может производиться по статической характеристике.

Достоверно параметры процесса торможения при включении обмоток двигателя по схемам второй и первой групп могут быть определены только с учетом влияния электромагнитных переходных моментов, что наиболее просто осуществляется с помощью математического моделирования [10]. Приближенный учет переходных моментов при конструировании и анализе действия тормозных устройств малоинерционных приводов станков, обычно выполняемых при включении обмоток двигателя по схемам первой группы к двухполупериодному выпрямителю, можно производить, имея в виду изложенные выше соображения, а также нижеследующие положения.

При включении двигателя с незатухшим остаточным магнитным полем ротора возникает знакопеременный переходной момент, имеющий тормозной характер. Первый пик тем больше, чем быстрее происходит коммутация статорных цепей двигателя, и может достигать 4—6 M_n . Время затухания колебаний переходного момента зависит от сопротивления цепи статора и быстроты уменьшения скорости. Обычно имеют место три—пять пульсаций момента. При нулевых электромагнитных начальных условиях переходные моменты в начале торможения проявляются незначительно и могут не учитываться.

Из-за влияния переходных составляющих фактическая величина максимального (критического) тормозного момента составляет только половину величины, соответствующей установленному режиму при данной скорости вращения (по статической характеристике). В конце торможения возникают колебания скорости привода, увеличивающие время торможения. При торможении с нулевыми начальными условиями фактическое время торможения без учета этих колебаний возрастает на 20—30% против времени, определяемого по статической характеристике. Полное время торможения с учетом времени колебаний увеличивается вдвое.

Переходные моменты в начале торможения, возникающие при ненулевых условиях, уменьшают время торможения. При величине остаточного потока (и остаточной ЭДС E_1), равной примерно 0,6 номинального, полностью компенсируется снижение эффективности торможения от уменьшения критического момента. Если остаточный поток превышает 0,75 номинального, то действие переходных моментов преобладает и фактическое время торможения без учета колебаний скорости в конце торможения оказывается меньше, а полное время примерно соответствует рассчитанному по статической характеристике.

С увеличением инерционности привода влияние переходных моментов на время торможения уменьшается. При суммарном приведенном моменте инерции привода, превышающим пятикратную величину момента инерции ротора двигателя, можно

считать, что в зоне низких скоростей динамическая характеристика соответствует статической. Увеличение статического момента нагрузки увеличивает влияние переходных моментов на время и путь торможения, снижает фактическую величину критического момента, но демпфирует колебания скорости, в конце торможения. Приведенные выше данные о влиянии переходных моментов справедливы при величинах статического момента меньше $0,1—0,2 M_n$, что имеет место во многих приводах станков.

Повышение эффективности динамического торможения возможно путем увеличения возбуждающего тока, но при этом значительно увеличивается влияние переходных моментов на время и путь торможения, а следовательно, снижается точность торможения, увеличивается нагрев статорных обмоток двигателя. Более рациональным способом управления переходными моментами и повышения эффективности торможения для приводов станков является увеличение тормозного момента в начале торможения за счет других способов торможения, например магнитного или конденсаторного.

МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

Использование энергии остаточного затухающего магнитного поля для предварительного снижения скорости перед подачей выпрямленного тока может существенно повысить эффективность процесса торможения. Применение такого магнитно-динамического торможения (МДТ) особенно целесообразно в тех случаях, когда необходимо получить быструю и точную остановку малоинерционных приводов или повысить точность останова инерционных приводов за счет уменьшения разброса величин пути и времени торможения [15].

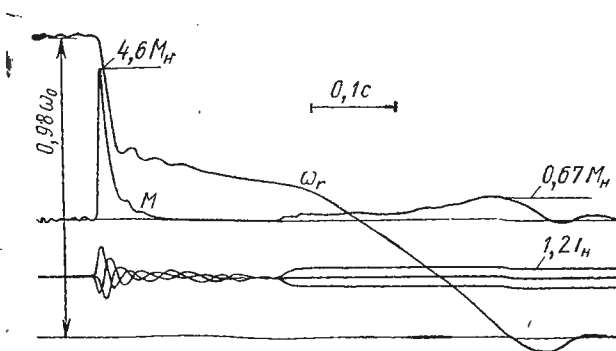


Рис. 16. Осциллограмма магнитно-динамического торможения асинхронного двигателя АО2-21-4 (приведенный суммарный момент инерции привода составляет 1,6 момента инерции ротора двигателя; статический момент нагрузки меньше $0,1$ номинального)

Рассмотрим типичную осциллограмму двухступенчатого магнитно-динамического торможения малоинерционного привода (рис. 16). На первой ступени под действием эффекта магнитного торможения, реализуемого замыканием накоротко обмотки статора, происходит интенсивное снижение частоты вращения скорости двигателя и гашение остаточного поля ротора. После подачи возбуждающего тока знакопеременные электромагнитные переходные моменты не проявляются и происходит плавная и быстрая остановка двигателя. Невелики и колебания в конце процесса торможения.

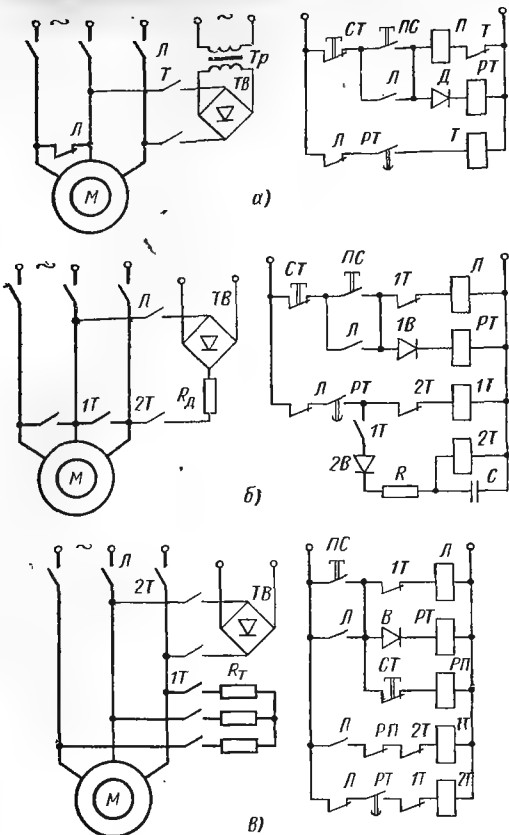
Оба способа торможения действуют последовательно и независимо друг от друга. Эффективность торможения возрастает с уменьшением интервала времени между окончанием магнитного и началом динамического торможения. Поскольку магнитное торможение заканчивается за 2—3 периода переменного тока (0,04—0,06 с), то целесообразно применение быстродействующей коммутационной аппаратуры. Если динамическое торможение начинается до полного затухания поля ротора, то тормозной эффект несколько увеличивается за счет возникающих переходных составляющих момента, как это имеет место при динамическом торможении с нулевыми начальными условиями. Вместе с тем снижаются точность и стабильность торможения. Оптимальным решением является включение источника возбуждающего тока сейчас же после затухания магнитного поля ротора.

Эффективность МДТ в значительной степени определяется тормозным эффектом на первой ступени и зависит поэтому от мощности и инерционности привода. Для малоинерционных приводов станков с двигателями мощностью до 4 кВт при применении быстродействующей аппаратуры время торможения уменьшается в среднем в 1,8—2 раза, а тормозной путь соответственно в 3—4 раза по сравнению с чистым динамическим торможением. Сокращаются и потери энергии при динамическом торможении, которое теперь начинается не со скорости вращения, близкой к ω_0 , а со скорости вращения $\omega_{от}$, определяемой по выражению (1). Суммарные потери уменьшаются в меньшей степени. Они определяются величиной энергий, запасенной вращающимися массами привода перед началом магнитного торможения, и потерями в статоре при динамическом торможении, сокращенными за счет уменьшения продолжительности его действия. Соответственно увеличивается и число торможений в единицу времени, допустимое по условиям нагрева.

Расчет пути и времени торможения может производиться отдельно поэтапно: на первом этапе — по соображениям, изложенным выше, а на втором — по статической характеристике динамического торможения.

Наиболее просто МДТ реализуется по схеме, приведенной на рис. 17, а, в которой использованы размыкающий контакт

Рис. 17. Схемы магнитно-динамического торможения



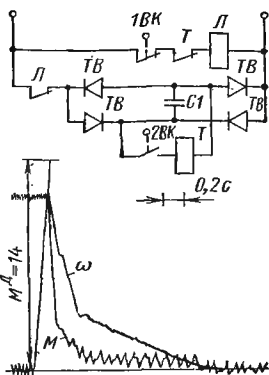
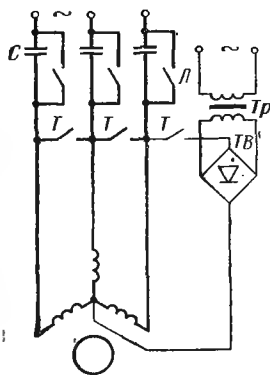
пускового контактора $\mathcal{L}$ для замыкания цепи статора. Поскольку выпрямленный ток подается в статорную обмотку при замкнутом контакте $\mathcal{L}$, то применяют несимметричное замыкание цепи статора, что несколько снижает эффект магнитного торможения. При применении быстродействующей аппаратуры более эффективное торможение может быть получено при применении отдельного аппарата для замыкания цепи статора (рис. 17, б). При нажатии на кнопку CT выжидает контактор $\mathcal{L}$, отключающий двигатель от сети переменного тока и включающий через замкнутые контакты реле времени PT контактор $1T$, замыкающий обмотку

ку статора накоротко. Чем быстрее произойдет замыкание контактов $1T$ после отключения $\mathcal{L}$, тем больше будет эффект магнитного торможения. Контактор $1T$ подает напряжение на контактор $2T$, который включается с небольшой выдержкой времени, создаваемой параллельным включением электролитического конденсатора C . При включении $2T$ начинается динамическое торможение и отключается контактор $1T$. После окончания торможения реле PT отключает контактор $2T$. Для получения небольшой задержки на включение контактора $2T$ емкость конденсатора C не превышает 20—30 мкФ при величине сопротивления резистора R 1—1,5 кОм для реле ПЭ-21, РПК-1 и им подобным. Чтобы исключить возможность замыкания контактов $2T$ до размыкания контактов $1T$ в цепь возбуждающего тока включен резистор R_d , ограничивающий ток выпрямителя при включении его на замкнутые контакты контактора $1T$.

Наибольшую эффективность торможения обеспечивает схема с разрядным резистором (рис. 17, в), аналогичная схеме

Рис. 18. Схема управления и осциллограмма магнитно-динамического торможения двигателя привода механизма инструментального магазина

магнитного торможения (см. рис. 7). При нажатии кнопки *СТ* включается контактор *1Т*, подключающий к статорной цепи двигателя резисторы R_T и



разрывающий цепь питания пускового контактора *Л*, который отключает двигатель от сети. После этого включается контактор *2Т*, подключая к статорной обмотке выпрямитель и отключая контактор *1Т*. После окончания торможения реле *РТ* отключает контактор *2Т*. Если необходима небольшая задержка во включении контактора *2Т* с тем, чтобы подача выпрямленного тока контактором *2Т* производилась после полного затухания потока ротора, то *2Т* должен включаться, как в предыдущей схеме, через вентиль и резистор с параллельным конденсатором.

В качестве примера удачного применения МДТ на рис. 18 приведена схема, разработанная для точной остановки привода инструментального магазина смены инструмента на 30 позиций сверлильно-фрезерно-расточного станка с программным управлением с приводным двигателем АОЛ-012-2 [24]. Угловой тормозной путь равен 180° , а требуемая точность $\pm 15'$. Из-за большого передаточного числа редуктора приведенные к скорости вала двигателя суммарный момент инерции привода и статический момент составляют соответственно 1,3 момента инерции ротора двигателя и 0,1 номинального.

Для повышения эффективности и стабильности торможения на первой ступени применены последовательные конденсаторы, которые включаются при отключении линейного контактора. Напряжение на обмотках двигателя при этом повышается на 20—25%, что обеспечивает независимость начальной величины магнитного потока от случайных колебаний напряжения сети и, следовательно, постоянство начальных электромагнитных условий. Некоторое увеличение запаса магнитной энергии двигателя обеспечивает также увеличение пика тормозного момента и эффективности торможения. Как указывалось, для двигателей мощностью меньше 1 кВт при магнитном торможении возможно поглощение почти всей кинетической энергии, запасенной вращающимися массами, поэтому вторая ступень торможения нужна только для фиксации и повышения точности остановки

Тормозной момент может быть невелик. Основным требованием является сведение к минимуму влияния переходных моментов в конце торможения. Этому требованию удовлетворяют схемы динамического торможения третьей группы, приведенные на рис. 14. Применение симметричной схемы торможения упрощает и схему управления, поскольку замыкание статора и подача выпрямленного тока в этом случае могут осуществляться одним контактором.

На рис. 18 приведена только часть схемы автоматического управления, относящаяся непосредственно к включению тормозного контактора T . При переключении путевого выключателя его размыкающий контакт $1BK$ отключает контактор L и на двигатель подается через последовательные конденсаторы повышенное напряжение. Блок-контакт L подключает через мостовой выпрямитель конденсатор $C1$, который заряжается и обеспечивает четкое включение контактора T после срабатывания замыкающего контакта $2BK$.

Осциллограмма тормозного процесса иллюстрирует плавность и эффективность торможения. Получаемая точность характеризуется средним арифметическим значением тормозного пути, равным $180'$. Доверительные интервалы среднего значения тормозного пути $180,8' > \varphi > 179,2'$. Разброс случайных значений тормозного пути для $99,73\%$ возможных торможений не превышает $\pm 10'$.

Применение любой схемы магнитно-динамического торможения позволяет выбирать выпрямители на низкое обратное напряжение, не учитывая максимальную величину ЭДС статора, что необходимо при обычном динамическом торможении без гашения остаточного магнитного потока двигателя.

Возможны и многие другие модификации реализации МДТ. В частности, известны схемы с однополупериодным выпрямлением возбуждающего тока, которые получили название схем индукционно-динамического торможения [7, 9]. В этих схемах имеют место периодические (каждые полпериода) замыкания обмотки статора через вентиль, вызывающие соответственно пики тормозного момента. Такой пульсирующий тормозной момент магнитного торможения накладывается на небольшой тормозной момент, создаваемый небольшой постоянной составляющей возбуждающего тока однополупериодного торможения. Магнитное и динамическое торможение действуют здесь совместно. Эффективность торможения увеличивается и в некоторых схемах может быть соизмеримой с эффективностью динамического торможения при двухполупериодном выпрямлении возбуждающего тока. Однако динамика режима торможения в этих схемах несравненно сложнее и хуже из-за непрерывного значительного действия переходных моментов.

КОНДЕНСАТОРНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА

Получившее широкое распространение конденсаторное торможение основано на явлении так называемого самовозбуждения, или, что более правильно, емкостного возбуждения асинхронной машины, поскольку необходимая для возбуждения генераторного режима реактивная энергия доставляется подключенными к статорной обмотке конденсаторами. В этом режиме машина работает с отрицательным по отношению к вращающемуся магнитному полю, созданному возбужденными в статорной обмотке свободными токами, скольжением, развивая на валу тормозной момент.

Режим конденсаторного торможения является сложным электромеханическим переходным процессом, характер и интенсивность которого определяются параметрами двигателя, привода и тормозного устройства. Установившийся режим, когда под действием активной нагрузки асинхронная машина с подключенными к статорной обмотке конденсаторами вращается с постоянной скоростью, развивая тормозной момент, оказывается только частным и относительно редким случаем. Однако представление об основных особенностях конденсаторного торможения, необходимое для его рационального применения, удобнее всего получить, рассматривая именно установившийся режим.

Общепринятые при анализе режимов асинхронных машин допущения о линейности их электрических и магнитных цепей нельзя применять для достоверного математического описания режима конденсаторного торможения. Достаточно близкую к физической реальности качественную и количественную картину режима можно получить только решая с помощью ЭВМ нелинейные дифференциальные уравнения соответствующей математической модели [17]. Приводимое ниже описание особенностей режима основано на результатах математического моделирования, дополненных экспериментальными исследованиями.

Минимальная величина емкости, необходимая для возбуждения асинхронной машины при данной скорости вращения и подключаемая к одной фазе обмотки статора,

$$C_{\min} = \frac{I_m \cdot 10^6}{U_H \omega_0} \text{ мкФ.} \quad (8)$$

Это выражение справедливо при равенстве сопротивлений — емкостного x_c и индуктивности намагничивания машины — x_m .

При переходе от холостого хода к номинальному режиму магнитный поток машины практически не меняется. Поэтому ток намагничивания I_m при холостом ходе можно принять равным току намагничивания I_{mH} или току холостого хода I_{oH} при номинальной нагрузке, величину которого легко определить по каталогам. Соответственно величину емкости, необходимой для полной компенсации тока намагничивания при номинальной нагрузке, принято называть номинальной.

Величину номинальной емкости C_H можно получить из выражения (8), если в него подставить величину тока I_{oH} . При стандартной частоте сети 50 Гц номинальная емкость

$$C_H = 3185 \frac{I_{oH}}{U_H} \text{ мкФ.} \quad (9)$$

Это выражение справедливо при условии, что схема включения конденсаторов соответствует схеме включения обмоток статора асинхронной машины.

Для уменьшения суммарной величины емкости конденсаторы обычно включают треугольником. В этом случае при стандартном напряжении сети 380 В и соединении обмоток статора звездой номинальная емкость

$$C_H = 4,85 I_{oH} \text{ мкФ.} \quad (10)$$

При соединении обмоток статора двигателя треугольником и напряжении сети 220 В номинальная емкость

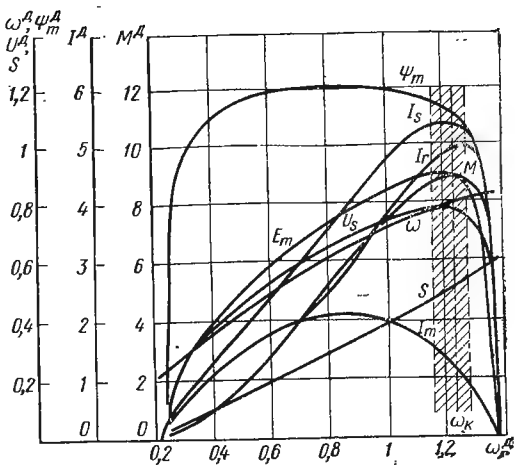
$$C_H = 14,5 I_{oH} \text{ мкФ.} \quad (11)$$

Величина емкости подключенных к двигателю конденсаторов, выраженная в долях номинальной, показывает степень компенсации реактивного тока двигателя, и, следовательно, имеют место соотношения

$$C^d = \frac{C}{C_H} = k = \frac{I_C}{I_{oH}} = \frac{x_c}{x_m} = \frac{Q_C}{Q_H}, \quad (12)$$

где k — коэффициент компенсации; I_C — ток конденсаторов (на фазу); Q_C и Q_H — реактивная мощность соответственно конденсаторов и номинальная двигателя.

Рис. 19. Типичные характеристики установившегося емкостного возбудителя асинхронного двигателя АОЛ2-11-4. Величина возбуждающей емкости 3×72 мкф (14,5 Св): Ψ_m — магнитный поток в воздушном зазоре; U_s , E_m — напряжение и ЭДС статора; I_m , I_r , I_s — токи намагничивания, ротора и статора; ω , ω_k — угловая и угловая опрoкidyвающая частоты токов статора; s — скольжение; M — тормозной момент



Сравнивая различные режимы торможения с различной величиной возбуждающей емкости, удобно выражать емкость в долях номинальной, что и принято ниже для всех графиков и осциллограмм.

Основной особенностью конденсаторного торможения (КТ) является ограниченность зоны существования режима двумя значениями скорости вращения машины, которые принято называть критическими. Как видно из типичных графиков установившегося тормозного режима (рис. 19), зона КТ начинается с некоторой низшей критической скорости $\omega_{кр}$, равной круговой частоте возбуждаемых свободных токов и соответственно магнитного поля.

Характер изменения токов и момента определяется как величиной ЭДС, зависящей от потока в воздушном зазоре и скорости поля, так и величиной сопротивлений статорной и роторной цепей, меняющихся с изменением частоты и степени насыщения магнитных цепей машины. С увеличением скорости ротора растет и ЭДС, хотя поток Ψ_m практически остается постоянным. Полное сопротивление цепи статора уменьшается за счет изменения реактивного сопротивления, которое из-за перекompенсации имеет емкостный характер. Активная составляющая полного сопротивления роторной цепи уменьшается за счет роста скольжения, а реактивная растет. Однако при малых скольжениях из-за преобладания активного сопротивления полное сопротивление также уменьшается. Рост величины токов статора и ротора приводит к еще более значительному увеличению электромагнитного момента, который в этом режиме определяется тепловыми потерями как в роторе, так и в статоре.

С ростом скорости вращения, начиная с нижней критической, растут частота токов, ЭДС, скольжение, токи и момент. Одновременно увеличивается размагничивающая составляющая потока, создаваемая роторным током. При некоторой скорости

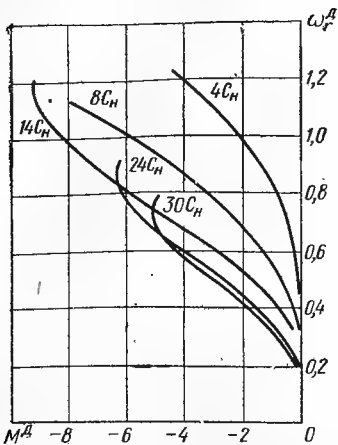


Рис. 20. Механические характеристики двигателя АОЛ2-11-4 при конденсаторном торможении с различными величинами емкости подключенных симметрично конденсаторов

произведение частоты и потока, определяющее величину ЭДС, достигает максимума. Соответственно ток и момент также имеют максимальную величину. При дальнейшем росте скорости вращения преобладающее влияние оказывает размагничивающее действие токов ротора, что приводит к уменьшению потока, ЭДС, токов и момента и последующему прекращению режима при верхней критической скорости вращения ω_{TKB} .

С увеличением индуктивности рассеяния ротора размагничивающее влияние токов ротора начинает сказываться при меньших скоростях вращения. Соответственно максимумы тока и момента достигаются при более низкой скорости вращения и имеют меньшую абсолютную величину из-за меньшей величины ЭДС. Увеличение индуктивности рассеяния статора при постоянной величине емкости уменьшает частоту свободных колебаний и увеличивает скольжение, что еще больше увеличивает индуктивное сопротивление рассеяния ротора. Уменьшение частоты дополнительно снижает величину ЭДС, а следовательно, и момент.

Увеличение возбуждающей емкости приводит к уменьшению нижней критической скорости вращения и частоты возбужденных токов, увеличению скольжения и сопротивления рассеяния ротора. Зона существования режима сужается и перемещается в область более низких скоростей вращения, а максимальные величины токов и момента уменьшаются (рис. 20).

Устойчивый установившийся режим практически возможен только на восходящей части характеристик. В зоне скоростей вращения, соответствующих максимальным величинам токов и момента, при некоторой опрокидывающей скорости происходит резкое прекращение режима. Это объясняется лавинообразным характером уменьшения токов после перехода их величин через максимум из-за уменьшения степени насыщения магнитной цепи и соответствующего роста индуктивности рассеяния.

Опрокидывающая скорость вращения для асинхронных двигателей общего применения

$$\omega_{TK} = K_{\omega} \omega_{TKB}, \quad (13)$$

где K_{ω} — коэффициент, изменяющийся от 0,75 до 0,9 в зависи-

мости от мощности двигателя и его параметров; в среднем можно принимать $K_{\omega} = 0,8$.

Для определения верхней критической скорости вращения $\omega_{гк.в}$ и соответствующей ей угловой частоты $\omega_{в}$ можно рекомендовать выражения

$$\left. \begin{aligned} \omega_{гк.в} &= \left(1 + k_r^2 \frac{r_r'}{r_s} \right) \omega_{в}; \\ \omega_{в} &= \sqrt{\frac{x_c}{x_k} - \frac{r_s^2}{\sigma k_r^2 x_m^2}}; \\ k_r &= \frac{x_m}{x_r}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

в которых учитывается как влияние активных сопротивлений, так и насыщения магнитной цепи подстановкой соответствующих величин индуктивностей короткого замыкания x_k и намагничивания x_m . При малых насыщениях на верхней границе зоны самовозбуждения величина k_r изменяется в пределах 0,9—0,97 и может быть принята равной 1.

Величина нижней критической скорости вращения

$$\omega_{гк.н} = \sqrt{\frac{x_c}{x_s} + \frac{2r_s r_r'}{x_m}} \quad \text{или} \quad \omega_{гк.н} \approx \sqrt{\frac{x_c}{x_s}}. \quad (15)$$

Второе из этих выражений можно применять при отсутствии в цепи статора добавочных резисторов. В этом случае для практических расчетов может быть рекомендовано еще более простое выражение

$$\omega_{гк.н}^2 = \frac{0,88}{\sqrt{C^2}}, \quad (16)$$

в котором скорость вращения выражена в долях от синхронной.

Во всей зоне существования режима, за исключением скоростей вращения, близких к нижней и верхней критическим, магнитный поток машины значительно превышает номинальное значение и сохраняет практически постоянную величину, что является другой характерной особенностью конденсаторного торможения. При этом двигатели с алюминиевым корпусом имеют меньшую величину магнитного потока (1,3—1,4 номинального), чем машины с чугунными корпусами (1,8—2 номинального).

Значительное возрастание магнитного потока вызывает увеличение степени насыщения магнитной цепи и потерь в стали от вихревых токов. Увеличение потока приводит к резкому возрастанию потерь (при частоте 50 Гц), величина которых делается соизмеримой с номинальной мощностью двигателя и ее необходимо учитывать (рис. 21). У двигателей с алюминиевым

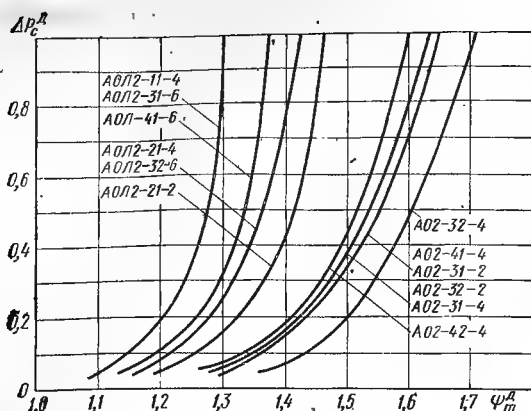


Рис. 21. Экспериментальные кривые изменения относительных потерь в стали ΔR_c^A некоторых двигателей единой серии в функции относительной величины магнитного потока Ψ_m^A (графики построены в долях от номинальных величин)

корпусом резкий рост потерь происходит при меньших величинах магнитного потока, чем у двигателя с чугунным корпусом, через который может проходить значительная часть магнитного потока.

При расчете характеристик установившегося режима пренебрежение потерями в стали приводит к значительным погрешностям в определении величины тормозных моментов, поскольку энергия на покрытие этих потерь передается через воздушный зазор с ротора. Рост потерь в стали увеличивает тормозной момент, чем и объясняется значительная величина тормозных моментов при относительно небольших величинах токов. Учет потерь с помощью известных выражений, по которым потери пропорциональны квадрату величины магнитной индукции, практически не влияет на повышение точности расчета. Для получения приемлемой точности расчетов величин тормозных моментов необходимо учитывать действительную величину потерь. Зависимость этих потерь от степени насыщения не имеет общего аналитического выражения и определяется конструкцией и материалом корпуса каждого конкретного двигателя. Определить величины потерь можно только экспериментальным путем одновременно со снятием кривой намагничивания, без которой сколько-нибудь точный расчет режима конденсаторного торможения вообще невозможен.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамические характеристики торможения определяются как процессом нарастания колебаний при возбуждении вращающейся с постоянной скоростью машины, так и электромеханическим переходным процессом при снижении скорости привода под действием тормозного момента.

Процесс возбуждения колебаний зависит от параметров и скорости вращения машины, величины емкости подключаемых

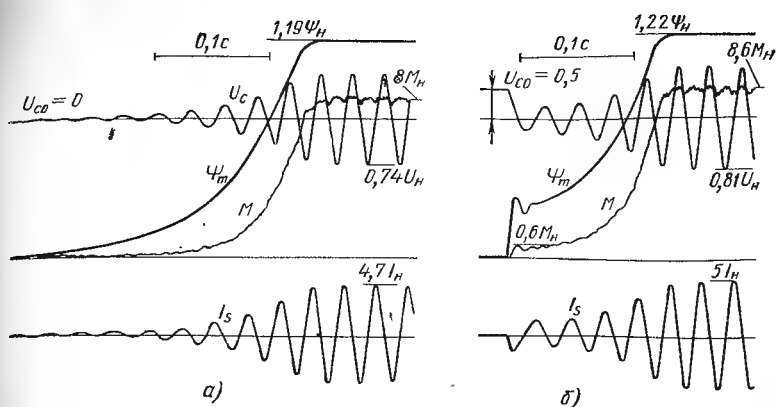


Рис. 22. Осциллограммы процесса возбуждения асинхронного двигателя АОЛ2-11-4, вращающегося с постоянной скоростью, равной синхронной, при подключении незаряженных (а) и частично заряженных (б) конденсаторов емкостью 3×72 мкФ:

Ψ_m — магнитный поток; M — момент; I_s — ток статорной обмотки; U_c — напряжение на конденсаторах

конденсаторов и начальной величины вносимой в колебательный контур энергии. При подключении незаряженных конденсаторов к вращающемуся двигателю с затухшим после отключения от сети магнитным полем колебания развиваются постепенно (рис. 22, а). Увеличение начального заряда конденсаторов ускоряет процесс возбуждения (рис. 22, б). Аналогично действует и начальный поток машины. Изменение параметров машины и величины емкости конденсаторов влияет на интенсивность возбуждения, но не меняет характер процесса. При полностью заряженных конденсаторах или полном магнитном потоке машины процесс возбуждения развивается практически мгновенно (0,01—0,02 с).

Возбуждающие конденсаторы могут подключаться к статорной обмотке двигателя непосредственно или через отдельный коммутирующий аппарат (рис. 23). В первом случае имеет место так называемое *глухое* подключение, и процесс торможения начинается сразу после отключения двигателя от сети линейным аппаратом L . Начальные величины заряда конденсаторов и магнитного потока машины определяются величиной напряжения сети в момент отключения, а характер электрохимического переходного процесса зависит от величины возбуждающей емкости, момента инерции вращающихся масс привода, величины нагрузки и параметров двигателя. Во втором случае торможение начинается только после подключения к двигателю конденсаторов, следующего за отключением двигателя от сети. Начальные условия и, следовательно, характер тормозного про-

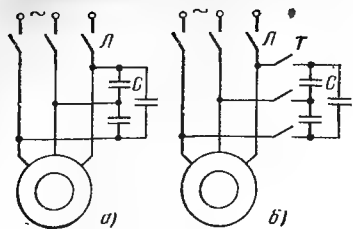


Рис. 23. Глухое (а) подключение возбуждающих конденсаторов к статорной обмотке двигателя и после отключения двигателя от сети (б)

цесса в значительной степени зависят от длительности интервала между операциями переключения коммутационных аппаратов L и T .

При отключении от сети двигателя с глухо подключенным симметричным конденсатором сразу начинается обмен энергией между конденсаторами и статорной обмоткой. Разряд конденсаторов в зависимости от величины возбуждающей емкости может иметь аperiodический или при обычно применяемой величине емкости колебательный характер. В последнем случае возникающие в статорной цепи свободные токи создают круговое поле с угловой частотой, меньшей частоты вращения ротора, и машина оказывается в генераторном режиме. Величины передаваемой с ротора энергии и возникающего тормозного момента зависят от разности между этими частотами.

Передаваемая энергия в начале процесса расходуется в основном на приращение энергии магнитного поля, и возникающий переходный тормозной момент достигает максимальной величины при наибольшей скорости изменения магнитного потока: в самом начале переходного процесса. Когда поток достигает установившейся величины, электромагнитный переходный процесс прекращается и тормозной момент уменьшается до величины, соответствующей установившемуся генераторному режиму, при котором энергия расходуется в основном на покрытие потерь в меди и в стали статора. При небольших моментах инерции из-за значительного снижения скорости вращения под действием переходного момента тормозной момент может иметь небольшую величину и не оказывать существенного влияния на процесс торможения. Типичная для такого режима осциллограмма приведена на рис. 24, а.

При большой величине возбуждающей емкости и небольшом моменте инерции привода скорость вращения двигателя в начальный период торможения при разряде конденсаторов, который в этом случае имеет аperiodический характер, быстро снижается и может стать меньше нижней критической. Режим емкостного возбуждения вообще не наступает, и процесс торможения (рис. 24, б) принципиально отличается от режима, связанного в той или иной степени с емкостным возбуждением. Непрерывное увеличение пика переходного момента с ростом возбуждающей емкости и его значительное влияние на тормозной процесс определяют принципиальное отличие последнего от его приближенного описания с помощью статических тормоз-

ных характеристик, когда весь эффект торможения объясняется действием только составляющей тормозного момента, связанной с явлением емкостного возбуждения асинхронной машины (генераторная составляющая).

При большом моменте инерции привода и высокой скорости вращения двигателя в начале процесса самовозбуждения эта составляющая может увеличиваться. В этом случае имеет место второй после переходного пик момента, после чего вместе с уменьшением скорости вращения плавно снижается до нуля (при нижней критической скорости) и величина момента (рис. 24, в). При значительной емкости пик переходного момента и при большом моменте инерции может быть настолько большим, что из-за резкого снижения скорости вращения второй пик момента (генераторной составляющей) может отсутствовать или быть слабо выраженным (рис. 24, г). В процессе торможения как при увеличении потока, так и особенно при резком снижении скорости вращения в обмотках статора и ротора возникают апериодические составляющие токов, создающие дополнительные знакопеременные моменты, накладывающиеся на основной тормозной момент. Действием этих составляющих объясняются,

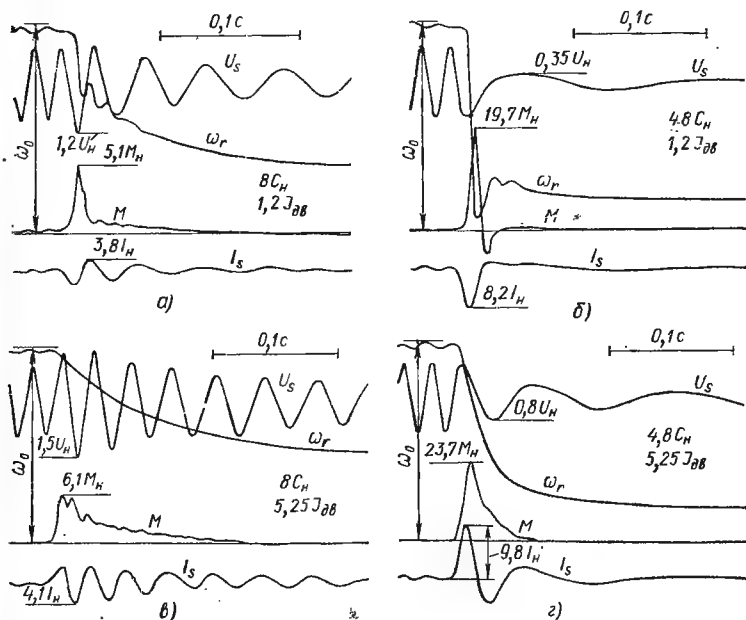


Рис. 24. Осциллограммы торможения двигателя АО2-31-4 при различных величинах емкости глухо подключенных конденсаторов и момента инерции привода:

U_s , I_s — напряжение и ток статора; M — момент; ω_r — частота вращения двигателя; $J_{дв}$ — момент инерции ротора двигателя

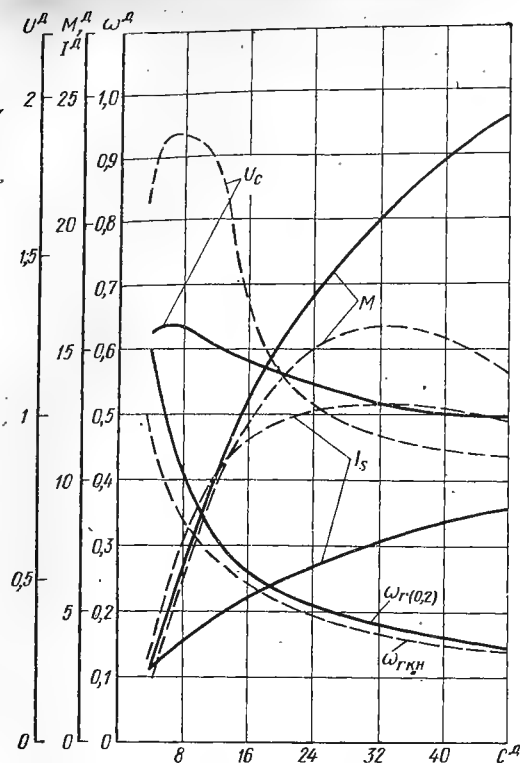


Рис. 25. Зависимости максимальных величин основных параметров конденсаторного торможения от величины возбуждающей емкости:
штриховой линией — в установившемся режиме; сплошной — фактические в тормозном переходном режиме; M — момент; I_s — ток статора; U_c — напряжение на конденсаторах; $\omega_r(0,2)$ — $\omega_{крн}$ — частота вращения ротора через 0,2 с после начала торможения и нижняя критическая

В частности, колебания момента и скорости в малоинерционных приводах (рис. 24, б).

Непрерывное с ростом величины возбуждающей емкости увеличение пика переходного момента и его значительное влияние на тормозной процесс определяют принципиальное отличие фактической картины режима торможения от описания его с помощью

статических тормозных характеристик, когда весь тормозной эффект объясняется действием генераторной составляющей момента, вызванной явлением емкостного возбуждения. Типовые усредненные графики для двигателей мощностью выше 1,5 кВт, приведенные на рис. 25, показывают отличие основных величин, определенных по статическим характеристикам установившегося режима, от фактических, действующих во время торможения. Следует отметить, что для двигателей мощностью меньше 1 кВт из-за значительно больших относительных сопротивлений обмоток и меньших величин потока пика переходных моментов при величинах возбуждающей емкости меньше 16—20 C_n оказываются несколько меньше установившихся.

Характер тормозного процесса существенно изменяется, если незаряженные конденсаторы подключают к статору двигателя после его отключения от сети (см. рис. 23, б). В этом случае решающее влияние на режим торможения оказывает величина остаточной ЭДС, наводимой в обмотках статора затухающим потоком машины. Если остаточная ЭДС невелика, то процесс емкостного возбуждения развивается постепенно и генераторная составляющая тормозного момента плавно уве-

личивается. Вместе с ростом момента увеличивается замедление привода и соответственно снижается его скорость, поэтому максимальная величина тормозного момента оказывается меньше определяемой по статическим характеристикам установившегося режима. Величина максимума момента значительно меньше пика переходного момента при торможении с глухо подключенной емкостью, соответственно меньше и интенсивность торможения. Вместе с тем плавное нарастание момента определяет высокую плавность замедления привода.

Если остаточная ЭДС велика, то подключение незаряженных конденсаторов сопровождается импульсом зарядного тока, вызывающего пик переходного тормозного момента, обусловленного увеличением магнитного потока. Чем больше остаточная ЭДС и подключаемая емкость, тем больше пик момента и тем быстрее развивается процесс самовозбуждения (рис. 26).

Подключение возбуждающих конденсаторов к статору двигателя после его отключения от сети (см. рис. 23, б) позволяет управлять тормозным процессом, ограничивая пик переходного момента и увеличивая генераторную составляющую тормозного момента включением резисторов последовательно или параллельно с конденсаторами. Включение резисторов увеличивает активные потери и, следовательно, тормозной момент без увеличения тепловой нагрузки двигателя. При параллельном включении резисторов характер тормозного процесса и форма тормозного момента не меняются. При последовательном включении уменьшается пик переходного момента.

Величина максимального тормозного момента и эффективность торможения при постоянной величине возбуждающей емкости зависят от величины подключаемых резисторов. Эта зависимость имеет экстремальный характер. За счет увеличения

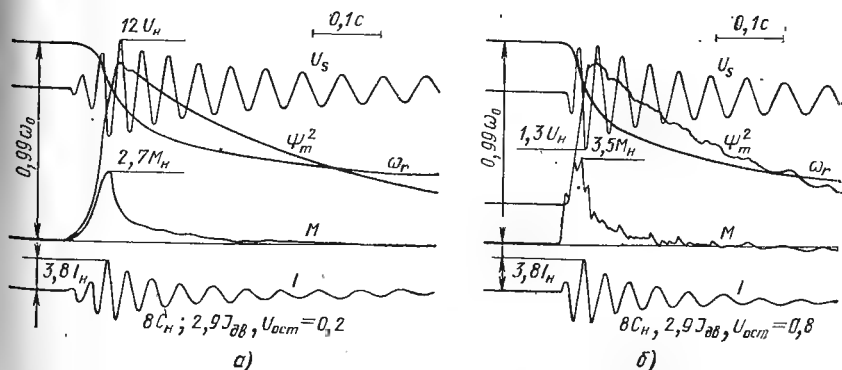


Рис. 26. Осциллограммы торможения двигателя АО2-31-4 при подключении возбуждающих конденсаторов после отключения двигателя от сети и различных величинах остаточной ЭДС на зажимах статора

активной составляющей тока уменьшаются намагничивающая составляющая, магнитный поток и напряжение на конденсаторе. Такой же тормозной момент достигается при меньшей величине тока статора двигателя. Приращение момента от введения оптимального сопротивления тем больше, чем меньше возбуждающая емкость.

Введение добавочных резисторов сужает зону емкостного возбуждения и, следовательно, зону торможения за счет увеличения нижней и уменьшения верхней критических скоростей вращения. При последовательном включении резисторов величина нижней критической скорости определяется по выражению (15) и с увеличением сопротивления изменяется незначительно. Напротив, величина верхней критической скорости, определяемая по уравнению (14), уменьшается значительно, но при обычно применяемых величинах емкости остается больше синхронной. При параллельном включении резисторов размагничивающая составляющая тока возрастает в большей степени и границы режима емкостного возбуждения сужаются по мере уменьшения величины сопротивления как за счет увеличения $\omega_{\text{TK.Н}}$, так и за счет уменьшения $\omega_{\text{TK.В}}$. При уменьшении сопротивления параллельного резистора R_2 резко увеличивается $\omega_{\text{TK.Н}}$. Критическая величина $R_{2\text{К}}$, при которой $\omega_{\text{TK.Н}} = \omega_0$, равна x_c .

Оптимальные сопротивления резисторов, дающие наибольший прирост начального тормозного момента по статической характеристике и фактического тормозного момента, несколько расходятся. Это расхождение уменьшается по мере увеличения приведенного момента инерции привода и, следовательно, мощности двигателей, поскольку с ростом мощности возрастает и их инерционная постоянная. Зона экстремума момента достаточно широка и малокритична к величине момента инерции привода, поэтому можно использовать графики усредненной зависимости оптимальных вершин сопротивления резисторов от величины возбуждающей симметричной емкости (рис. 27, а).

При последовательном подключении резисторов равной величины прирост тормозного эффекта меньше, чем при параллельном. При этом уменьшается и напряжение, прикладываемое к конденсаторам, что позволяет выбирать их на более низкое номинальное напряжение. Приведенные на рис. 27, б графики рассчитаны для усредненных параметров привода и являются типичными. Время торможения и максимальное напряжение на конденсаторах приведены в долях соответствующих величин для торможения без добавочных резисторов. Сопротивление дано в долях номинального.

Конденсаторы можно подключать к двигателю несимметрично. Предельными случаями несимметрии являются двухфазное и однофазное подключение. Процесс торможения принципиаль-

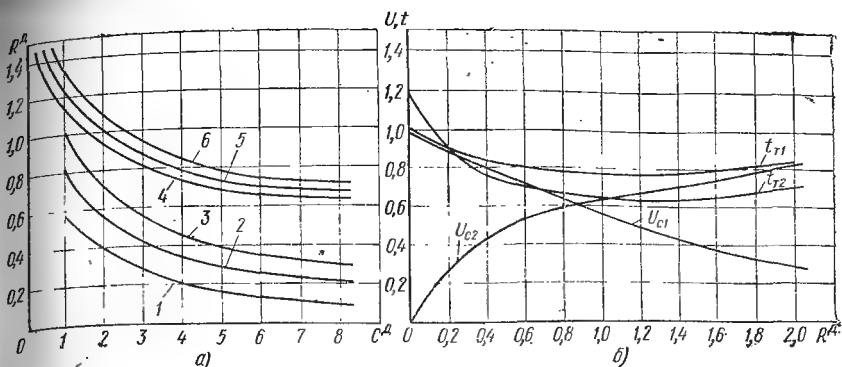


Рис. 27. Графики зависимостей:

а — оптимальной величины последовательно (1, 2, 3) и параллельно (4, 5, 6) включенных резисторов от величины возбуждающей емкости для двигателей мощностью до 3 кВт (1, 4), от 3 до 6 кВт (2, 5) и от 7 до 12 кВт (3, 6); б — времени торможения и максимальной величины напряжения на конденсаторах от сопротивления добавочных резисторов при их последовательном t_{T1} , U_{c2} и параллельном t_{T2} , U_{c2} включении

но не отличается от режима при симметричном подключении конденсаторов, но из-за несимметрии фазных токов в воздушном зазоре возникает не круговое, а эллиптическое вращающееся поле. Симметричный ротор в значительной степени сглаживает пульсации магнитного потока, но не устраняет появления составляющей тормозного момента, пульсирующей с двойной частотой возбужденных в статорной цепи свободных токов. Совместное действие пульсирующей и постоянной составляющих момента определяет его знакопеременный характер (рис. 28).

Уменьшение скорости нарастания колебаний приводит к значительному уменьшению пиков переходных моментов, обусловленных увеличением магнитного поля. Изменение начальных условий позволяет еще больше ограничивать эти пики. Первый

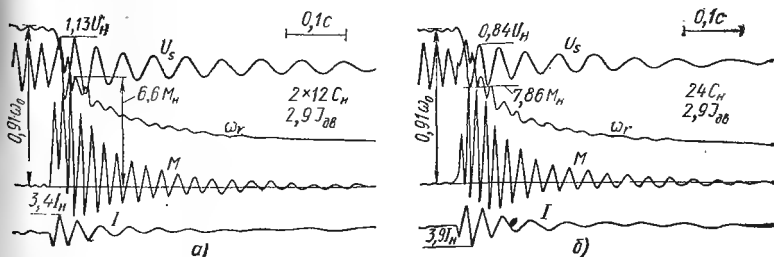


Рис. 28. Осциллограммы конденсаторного торможения при двухфазном (а) и однофазном (б) подключении незаряженных конденсаторов к статору отключенного от сети двигателя АО2-31-4 с остаточным напряжением 0,8 номинального

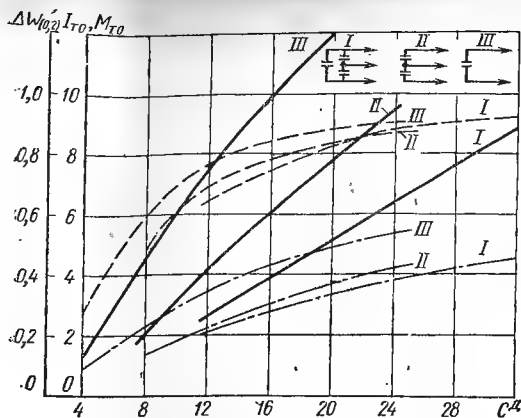


Рис. 29. Кривые сравнительной эффективности конденсаторного торможения при симметричном и несимметричном подключении конденсаторов:

M_{T0} (сплошная линия), I_{T0} (штриховая) — тормозной момент и ток в начале торможения в долях от номинальных; $\Delta W(0,2)$ (штрихпунктирная) — величина поглощаемой за 0,2 с части кинетической энергии, запасенной вращающимися массами привода при синхронной скорости

пик момента и соответствующее ему снижение скорости в значительной степени зависят от пространственной фазы вектора магнитного потока относительно оси обмотки, к которой подключены конденсаторы, в момент включения. Наибольший пик момента имеет место при угле 90 эл. град. Разброс в величинах первого пика момента может достигать 35%. Увеличение момента инерции привода и уменьшение емкости уменьшают влияние фазы включения. Для малоинерционных станочных приводов возможный разброс в величинах момента следует учитывать.

При постоянной величине суммарной емкости несимметричное подключение конденсаторов увеличивает эффективность торможения. В еще большей степени увеличиваются пики тормозных моментов и токов. На рис. 29 приведены типичные для двигателей мощностью от 1,5 до 15 кВт усредненные зависимости пиков тормозного момента и тока в начале торможения (при $\omega_r = \omega_0$), а также величины поглощенной в процессе торможения за время 0,2 с кинетической энергии вращающихся масс привода от величины суммарной возбуждающей емкости для трех возможных схем подключения конденсаторов.

Расчеты показывают, что для получения равной эффективности торможения величины суммарной емкости конденсаторов, подключаемых симметрично и несимметрично в две и одну фазы, находятся в соотношении 1 : 0,93 : 0,7, поэтому применение двухфазного подключения емкости нецелесообразно. Однофазное включение дает заметное сокращение суммарной емкости и экономически оправдано. Учитывая, однако, что из-за пульсаций тормозного момента и увеличения его пиков при несимметричном включении создается повышенная динамическая нагрузка на приводимый механизм, целесообразность однофазного включения конденсаторов должна быть обоснована в каждом отдельном случае.

Конденсаторное торможение характеризуется ограниченностью зоны действия, возможностью получения значительных тормозных моментов в начале торможения при высокой скорости привода и непрерывным уменьшением величины тормозного момента. Большие тормозные моменты достигаются при токах, превышающих номинальный, поэтому получение их при постоянной частоте вращения ограничено перегревом двигателя. Этот вид торможения весьма экономичен, поскольку происходит практически без потребления энергии из сети. Электрическая энергия W_t , преобразующаяся в тепло в процессе торможения и рассеиваемая в цепях двигателя, создается за счет энергии, запасаемой вращающимися массами W_k , электрическим полем конденсаторов W_c и магнитным полем двигателя W_m . Следовательно,

$$W_t = W_k + W_c + W_m \quad (17)$$

Энергия электрического поля трехфазного конденсатора и его мощность принимают условно равными сумме максимальных энергий (мощностей) отдельных фаз. При соединении конденсаторов с равной величиной емкости C (мкФ) треугольником и подключении к сети напряжением U (В) их суммарная энергия

$$W_c = \frac{3CU^2}{2} 10^{-6} \text{ Дж}, \quad (18)$$

а реактивная мощность

$$P_c = 3\omega CU^2 = 2\omega W_c \text{ В} \cdot \text{А}. \quad (19)$$

При стандартной частоте сети 50 Гц и напряжении 380 В

$$\left. \begin{aligned} W_c &= 0,216C \text{ Дж}; \\ P_c &= 0,136C \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{aligned} \right\}$$

Эти соотношения показывают, что даже при значительной реактивной мощности запас энергии в конденсаторах весьма мал.

Запас энергии магнитного поля асинхронного двигателя может быть принят равным запасу энергии в конденсаторах при коэффициенте компенсации (12), равном единице. Для асинхронных двигателей единых серий запас энергии магнитного поля при номинальном напряжении составляет 2—4% величины кинетической энергии, запасаемой ротором при синхронной скорости. Следовательно, даже при значительной емкости возбуждающих конденсаторов суммарная энергия, запасаемая в их электрическом поле и магнитном поле двигателя, не превышает 15—20% запаса кинетической энергии привода в начале торможения. Можно приблизительно считать, что суммарные потери в двигателе примерно в 2 раза меньше, чем при дина-

мическом торможении или при пуске, и в 6 раз меньше, чем при противотоковом торможении. Поэтому конденсаторное торможение является весьма эффективным способом быстрого поглощения основной части кинетической энергии привода при малой величине тормозного пути и незначительном нагреве двигателя в процессе торможения.

При глухом подключении конденсаторов торможение начинается сразу после отключения двигателя от сети и не требует для своей реализации дополнительных коммутационных аппаратов. Подключение незаряженных конденсаторов после отключения двигателя от сети дает возможность управлять формой момента и интенсивностью торможения и получать плавное торможение с постепенным увеличением тормозного момента без заметных рывков. Торможение осуществляется и при исчезновении напряжения питающей сети.

Применение конденсаторного торможения особенно рационально для:

эффективной остановки механизмов станков, имеющих постоянную составляющую статического момента не ниже 0,3 номинального момента двигателя; поглощения основной части кинетической энергии вращающихся масс с целью разгрузки, уменьшения износа и повышения надежности механических тормозов и различного рода фиксаторов, предварительного снижения частоты вращения перед реверсом двигателя для уменьшения его нагрева и повышения как эффективности противотокового торможения, так и допустимого числа реверсов; предварительного снижения частоты вращения двигателя и повышения эффективности других способов торможения, создающих тормозной момент при низких скоростях.

При практическом применении КТ необходимо производить предварительную оценку эффективности, определять параметры тормозного устройства и тормозного процесса. Основным параметром является величина емкости, необходимой для поглощения в процессе торможения заданной части запаса кинетической энергии вращающихся масс привода.

Часть этой энергии, выраженная в долях от величины кинетической энергии вращающихся масс привода при синхронной скорости

$$\Delta W_K^D = 1 - (\omega_{гк.н}^D)^2, \quad (20)$$

где $\omega_{гк.н}$ выражена в долях синхронной скорости.

Из (20) с учетом уравнения (16) можно получить выражение для определения емкости (в долях от номинальной) конденсатора, который нужно включить симметрично в каждую фазу для поглощения энергии ΔW_K^D :

$$C^D = \frac{0,8}{1 - \Delta W_K^D}. \quad (21)$$

Из этого уравнения следует, что поглощение, например, 90% кинетической энергии вращающихся масс привода достигается под действием КТ при восьмикратной по отношению к номинальной величине емкости. Выражения (20) и (21) получены с использованием некоторых усредненных параметров двигателей единой серии и дают хорошее совпадение с опытными данными.

Для иллюстрации возможностей конденсаторного торможения в табл. 1 приведены некоторые опытные данные для двига-

Таблица 1

Параметры торможения двигателей общего применения

Тип двигателя	$M_{ст}^Д$	$J_{\Sigma}^Д$	$C^Д$	$\omega_{г.к.н}^Д$	Время торможения, с		$\Delta W_K^Д$
					до $\omega_{г.к.н}$	полного	
АО2-31-4	0	5	8	0,31	1,00	—	0,91
АО2-32-6	0	1	4	0,44	0,52	—	0,81
АО2-22-4	0,3	4	8	0,31	0,23	0,7	0,91
АО2-31-6	0,35	6	6	0,36	0,26	0,75	0,87

телей, часто применяемых в приводе станков. Величины статического момента и момента инерции привода даны в долях от номинального момента и момента инерции ротора двигателя.

Определение емкости, необходимой для получения в ограниченном интервале времени заданной величины замедления или тормозного пути, связано с расчетом зависимостей $M=f(t)$ и $\omega_r=f(t)$, что может быть выполнено относительно точно только с помощью ЭВМ [1, 17]. Предварительно время и путь торможения приближенно можно определить на основании линейной зависимости тормозного момента от скорости при наиболее часто используемой величине возбуждающей емкости симметрично подключенных конденсаторов в пределах 4—8 C_{II} на фазу. В этом случае зависимость $M_T=f(\omega_r)$ может быть представлена в виде

$$M_T = M_{T.M} \frac{\omega_r - \omega_{г.к.н}}{\omega_{г0} - \omega_{г.к.н}}, \quad (22)$$

где $M_{T.M}$ — максимальная величина тормозного момента при начальной частоте вращения двигателя $\omega_{г0}$, часто принимаемой равной синхронной ω_0 .

Величина $M_{T.M}$ может быть определена относительно точно только расчетом по экспериментальным данным конкретного двигателя [1]. Более просто с достаточной для практических

расчетов точно определены $M_{т.м}$ в долях от M_H можно производить по эмпирической приближенной зависимости

$$M_{т.м}^д = k_m C^д, \quad (23)$$

справедливой для двигателей единой серии мощностью до 15 кВт при $\omega_{г0} = \omega_0$. Величина коэффициента k_m различна для каждого конкретного двигателя, но в пределах наиболее часто применяемых величин емкости на фазу от 4 до 8 C_H может быть принята равной 0,75 для четырех- и шестиполусных двигателей и 0,6 для двухполусных при суммарных моментах инерции привода, не превышающих двукратной величины момента инерции ротора, и соответственно 0,7 и 0,5 для приводов с большими суммарными моментами инерции. В последнем случае при применении последовательных резисторов сохраняются величины 0,75 и 0,6.

Суммарное время торможения от начальной частоты вращения $\omega_{г0}$ до полной остановки под действием тормозного момента конденсаторного торможения и постоянного по величине статического момента $M_{ст}$

$$t = J_{\Sigma} \frac{\omega_0}{M_H} \left[\frac{\omega_{г0} - \omega_{гк.н}}{M_{т.м}} \ln \frac{M_{т.м} + M_{ст}}{M_{ст}} + \frac{\omega_{гк.н}}{M_{ст}} \right] \text{ с}, \quad (24)$$

в котором все величины в скобках выражены в долях от синхронной частоты вращения ω_0 и номинального момента двигателя M_H ; J_{Σ} — суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

В этом случае суммарный угловой путь торможения

$$\varphi = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{M_H} \left\{ \left(\frac{\omega_{г0} - \omega_{гк.н}}{M_{т.м}} \right) \left[1 - \left(\frac{M_{ст}}{M_{т.м}} - \frac{\omega_{гк.н}}{1 - \omega_{гк.н}} \right) \ln \frac{M_{т.м} + M_{ст}}{M_{ст}} \right] + \frac{\omega_{гк.н}^2}{2M_{ст}} \right\} \text{ рад}. \quad (25)$$

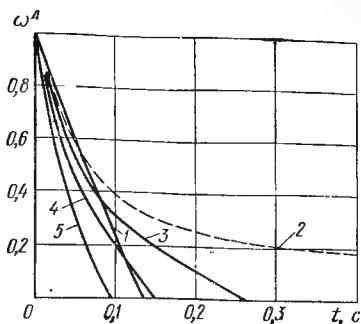
Расчеты по рекомендуемым выражениям дают результаты с погрешностью, не превышающей 20%.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

При совместном применении КТ с небольшим механическим тормозом, создающим постоянный тормозный момент, основная часть кинетической энергии вращающихся масс привода поглощается в результате конденсаторного торможения, а механический тормоз обеспечивает окончательную остановку механизма. Износ тормозных колодок (или тормозной ленты) прямо пропорционален величине кинетической энергии, поглощаемой тормозным устройством, поэтому при совместном применении

Рис. 30. Графики сравнительной эффективности торможения привода шпинделя:

1 — механическое с постоянным моментом M_T , равным номинальному ($M_T^D = 1$); 2 — конденсаторное при $C^D = 4,5$ и $M_T^D = 0$; 3 — то же, но при $M_T^D = 0,2$; 4 — то же, но при $M_T^D = 0,5$; 5 — то же, но при $M_T^D = 1$



КТ и механического тормоза значительно увеличивается срок его службы и повышается надежность.

Применение конденсаторов даже относительно небольшой ёмкости ($C^D = 4,5$) значительно разгружает механический тормоз, что позволяет уменьшить нажатие тормозных колодок и соответственно повысить их надежность и долговечность (рис. 30).

Конденсаторное торможение применяют также в схеме управления двигателем нормализованных силовых электромеханических головок ГС02 и ГС03, встраиваемых в автоматические линии станков [20] (рис. 31). По команде с автоматической линии (импульсное включение контакта РЦ) включается промежуточное реле РП, и если пиноль головки находится в исходном (крайнем заднем) положении, что контролируется размыкающим контактом микропереключателя тормоза ПТ, то РП самоблокируется. Включается пускатель Л, подключающий к сети двигатель с глухо подключенными к его статору конденсаторами С. В начале подачи пиноли контакты ПТ переключаются, реле РП выпадает, подготавливая схему к новому запуску. После окончания цикла работы головки и ее возвращения в исходное положение контакты ПТ также возвращаются в исходное положение и замыкающий контакт ПТ, размыкаясь, отключает двигатель, который под действием конденсаторного торможения резко останавливается.

Для многих механизмов автоматизированных металлорежущих станков характерно реверсивное движение. В резьбонарезных полуавтоматах необходимо правое и левое вращение шпинделя. В сверлильных автоматах сверление и вывод инструмента обеспечи-

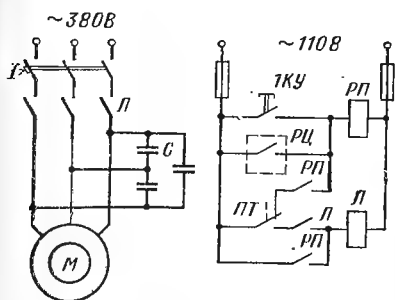


Рис. 31. Схема конденсаторного торможения двигателя электро-механических силовых головок

ваются движением пиноли вверх и вниз. Производительность этих и им подобных станков в значительной степени определяется числом реверсов, которое надежно обеспечивает электропривод в единицу времени.

Допустимое число реверсов наиболее простого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ограничивается перегревом его статорных обмоток, а жесткость и надежность привода снижаются из-за значительных динамических знакопеременных нагрузок, вызываемых электромагнитными переходными моментами. Применение конденсаторного торможения устраняет эти недостатки, значительно повышает допустимое число реверсов и заметно снижает динамические нагрузки. Например, при глухом подключении симметричной емкости величиной $3C_n$ на фазу за счет КТ обеспечивается снижение скорости до $0,5 \omega_0$ и поглощение 75% кинетической энергии, запасенной вращающимися массами привода. Если реверс начнется после КТ со скорости $0,5 \omega_0$, то потери энергии, рассеиваемой в двигателе в режиме противовключения, уменьшаются более чем в 2 раза. Увеличивая емкость, можно свести потери к еще меньшей величине. При суммарных приведенных моментах инерции привода, превышающих двух-трехкратную величину момента инерции ротора двигателя, целесообразно последовательно с конденсаторами включать резисторы с оптимальной величиной сопротивления (см. рис. 27, а).

Контроль продолжительности конденсаторного торможения и управление моментом включения реверсирующего аппарата может производиться в функции времени, скорости или напряжения на зажимах статорной обмотки двигателя.

В ОСКБ СС разработан привод резьбонарезного полуавтомата с повышенным за счет применения конденсаторного торможения числом реверсов [21] (рис. 32, а). Реверс производится в две ступени. Сначала одним из конечных выключателей, например IKB , отключается магнитный пускатель $Л$, и двигатель тормозится в режиме КТ, которое контролируется двухобмоточным реле $РН$. Одна из обмоток реле $РН$ включена на выпрямленное напряжение статора, а вторая — на опорное напряжение согласно с первой. Такое включение обмоток позволяет настроить $РН$ на отключение при весьма низких (до 1 В) величинах напряжения, поступающего с выпрямительного мостика $1Д$. По мере снижения частоты вращения двигателя под действием КТ напряжение на статоре уменьшается по амплитуде и по частоте. При заданной угловой скорости ($0,3—0,4 \omega_0$) реле $РН$ выпадает и замыкает свой контакт в цепи пускателя $П$, который подключает двигатель к сети с обратным порядком следования фаз. Происходит противотоковое торможение с облегченными за счет малого остаточного напряжения начальными электромагнитными условиями и, следовательно, относительно небольшими величинами пиков переходных моментов, а за-

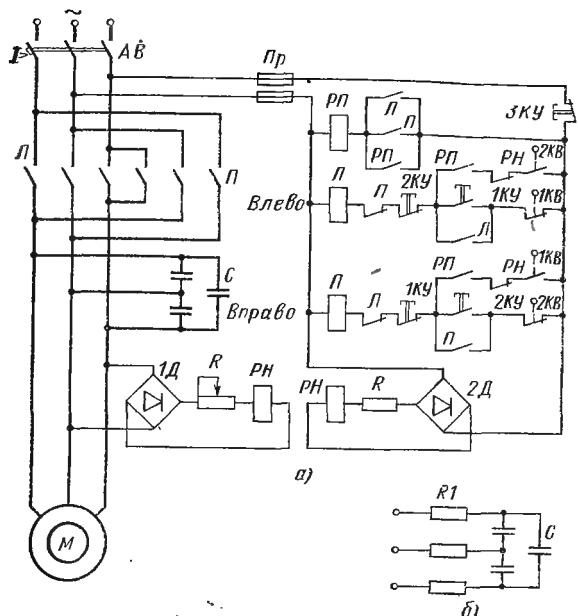


Рис. 32. Принципиальная схема (а) привода станка и схема включения (б) конденсаторов с последовательными резисторами

тем последующий разгон привода в противоположном направлении. При срабатывании второго конечного выключателя 2КВ цикл повторяется и двигатель вновь тормозится в режиме КТ с последующим реверсом.

При величине емкости конденсаторов на фазу, составляющей в среднем $3,5 C_n$, число допустимых реверсов без перегрева двигателя возросло более чем в 1,5 раза, достигнув 2,5 тысячи в час для двигателя АОЛ2-11-4. Значительно увеличился ресурс приводимого механизма. При включении последовательных резисторов по схеме рис. 32, б число допустимых реверсов в час удвоилось [23].

КОНДЕНСАТОРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ И КОНДЕНСАТОРНО-МАГНИТНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КДТ

Конденсаторно-динамическое торможение (КДТ) представляет собой сложный электромеханический режим, достоверное представление о котором необходимо как для определения рациональной области его применения, так и для конструирования наиболее эффективных тормозных устройств. Анализ тормозного режима и основных свойств КДТ удобнее всего провести, рассматривая наиболее простую и распространенную схему реализации (рис. 33), которая характеризуется глухим подключением к статорной обмотке двигателя конденсаторов, соединенных симметричным треугольником, и подачей выпрямленного тока от двухполупериодного выпрямителя в две фазы двигателя [13].

Характер процесса торможения в этом случае существенно изменяется в зависимости от промежутка времени между отключением двигателя контактором $\mathcal{L}$ и подачей выпрямленного тока контактором T . После отключения двигателя от сети практически мгновенно возникает режим конденсаторного торможения. Прекращение этого режима при скорости вращения $\omega_{\text{TK.н}}$ не означает, однако, полного исчезновения магнитного потока и снижения до нуля напряжения, наводимого в обмотке статора. Поэтому подключение выпрямителя при скорости вращения ротора, равной или близкой $\omega_{\text{TK.н}}$, сопровождается своеобразным коммутационным процессом, обусловленным тем, что выпрямитель оказывается включенным на встречное остаточное переменное напряжение с непрерывно уменьшающимися частотой и амплитудой. Не позже чем через половину периода под действием этого напряжения через выпрямитель проходит ток и происходит магнитное торможение. При оптимальном сочетании начальных условий и момента инерции привода в

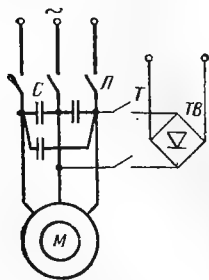
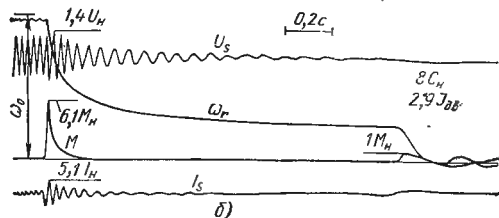
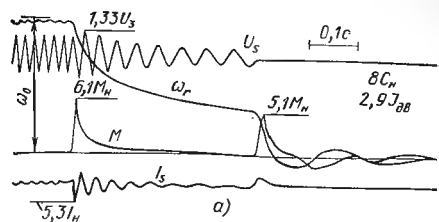


Рис. 33. Схема включения двигателя для реализации конденсаторно-динамического торможения (схема КДТ-1)

Рис. 34. Осциллограммы конденсаторно-динамического торможения двигателя АО2-31-4 при подключении выпрямителя после окончания конденсаторного торможения при неза-
(а) тухшем и полностью
(б) магнитном поле двигателя



этом случае может произойти полная остановка привода. Наличие выпрямленного тока в этом случае приводит только к значительным колебаниям скорости привода перед остановкой, как при динамическом торможении с резким снижением скорости. Процесс торможения (рис. 34, а) характеризуется в основном последовательным действием конденсаторного и магнитного торможения. Эффект динамического торможения лишь усиливает магнитное. При неблагоприятном сочетании начальных условий магнитное торможение не обеспечивает полной остановки привода, которая происходит под действием динамического торможения. В этом случае имеет место трехэтапное торможение: конденсаторное, магнитное, динамическое.

Если выпрямитель подключается при полностью затухшем магнитном поле двигателя, то магнитное торможение не возникает, а коммутационный переходный процесс при нулевых начальных условиях сопровождается малыми колебаниями электромагнитного момента, которые быстро затухают и не оказывают заметного влияния на режим торможения. Только в этом единственном случае КДТ состоит из двух последовательно действующих режимов: конденсаторного и динамического, а характер тормозного процесса не зависит от типа источника возбуждающего тока и сопротивления его цепи. Однако в этом случае (рис. 34, б) значительно увеличивается время торможения.

Подача возбуждающего тока до прекращения конденсаторного торможения при скорости вращения большей $\omega_{г.н}$ приводит к возникновению сложного переходного процесса из-за того, что источник выпрямленного тока оказывается включенным на встречное переменное напряжение асинхронной машины, работающей в генераторном режиме. Частота этого напряжения меньше частоты сети и непрерывно уменьшается в процессе торможения. При подключении выпрямителя в первый проводящий для генерируемого асинхронной машиной переменного

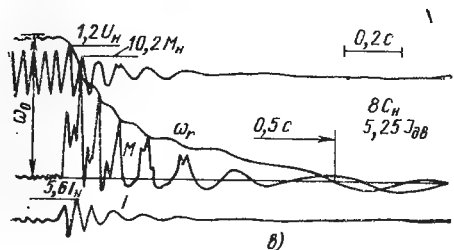
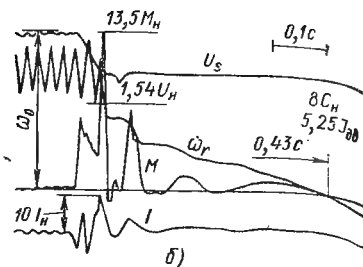
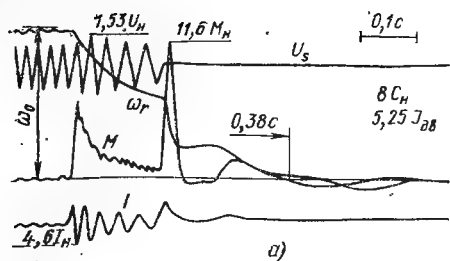


Рис. 35. Осциллограммы конденсаторно-динамического торможения двигателя АО2-31-4 при подключении выпрямителя до окончания конденсаторного торможения

напряжения полупериод возникает режим магнитного торможения. Величина тормозного момента определяется величинами магнитного потока машины и сопротивления цепи статора в проводящем направлении. Если подключение выпрямителя происходит в конце конденсаторного торможения при скорости вращения, мало отличающейся от $\omega_{\text{р.н.}}$, то после первого замыкания цепи статора скорость привода значительно снижается, магнитное поле двигателя полностью гасится и последующий режим динамического торможения начинается при нулевых электромагнитных начальных условиях (рис. 35, а).

Если выпрямитель подключается при скорости вращения значительно большей $\omega_{\text{р.н.}}$, то из-за замыкания только двух фаз обмотки статора самовозбуждение машины поддерживается однофазным колебательным контуром. В последующий непроводящий полупериод режим конденсаторного торможения восстанавливается, а в следующие проводящие полупериоды происходят повторные замыкания статорной цепи, но с уменьшающимися пиками тормозных моментов. Этот процесс прекращается только после того как в один из проводящих полупериодов происходит окончательный срыв самовозбуждения машины без последующего его восстановления. В этом случае (рис. 35, б) тоже наблюдается трехэтапное торможение: конденсаторное, магнитное и динамическое.

Длительность существования режима магнитного торможения и его эффективность определяются величинами электромагнитной и кинетической энергии в момент подключения выпрямителя, а также сопротивлением его цепи. Поэтому подача

выпрямленного тока сразу же после отключения двигателя от сети создает режим повторных замыканий с небольшими пиками тормозного момента (рис. 35, в). При отсутствии в цепи выпрямителя дополнительного резистора пики тормозных моментов могут превысить номинальный момент двигателя в 10—15 раз, что при определенных условиях представляет опасность для привода. Одновременно с этим магнитное торможение прекращается при относительно высокой скорости привода, что снижает общий тормозной эффект, обеспечиваемый КДТ. Введение добавочного резистора в цепь выпрямленного тока уменьшает пики тормозных моментов и несколько повышает эффективность торможения за счет увеличения длительности режима повторных замыканий.

При питании тормозного устройства напряжением от генератора постоянного тока физическая картина процесса КДТ изменяется мало. В этом случае при подключении источника постоянного тока с малым сопротивлением происходит замыкание цепи статора двигателя на источник и из-за малого внутреннего сопротивления источника возникает большой пик тормозного момента, а режим конденсаторного торможения прекращается. Поэтому подача постоянного тока должна производиться только при скорости привода, близкой к $\omega_{\text{р.к.н.}}$. При введении в цепь постоянного тока большого добавочного сопротивления возможно сохранение режима повторных замыканий и после подачи постоянного тока.

Таким образом, только в одном частном случае КДТ можно рассматривать как простую сумму последовательно действующих режимов-компонентов (конденсаторного и динамического). В общем же случае КДТ является сложным режимом, сопровождающимся специфическими явлениями, протекающими в существенно нелинейной электромеханической системе и зависящими от схемы и параметров тормозного устройства. Анализ режима в общем случае нельзя проводить по статическим характеристикам и применять принцип наложения. Статические характеристики КДТ, в тех случаях когда они существуют, не могут быть получены путем суммирования статических характеристик режимов-компонентов. Опасность получения больших ударных тормозных моментов при КДТ, способных привести к быстрому износу механической части привода, требует особого внимания при построении и выборе схем КДТ и параметров тормозных устройств.

Конструирование схем КДТ может производиться по одному из следующих трех принципов.

Первый принцип характеризуется подачей выпрямленного (или постоянного) тока после прекращения конденсаторного торможения и последовательным действием тормозных режимов — конденсаторного и динамического. При этом имеют место обычные коммутационные электромагнитные переходные про-

цессы. Статическая характеристика определяется суммой статических характеристик режимов-компонентов.

Второй принцип характеризуется перекрытием режимов при подаче выпрямленного тока до прекращения конденсаторного торможения. Возникающий при этом режим однократного или многократного магнитного торможения оказывает существенное влияние на тормозной процесс, который поэтому принципиально не может характеризоваться суммированием действия конденсаторного и динамического торможения. Статическая характеристика режима также не определяется суммой статических характеристик режимов-компонентов.

Третий принцип характеризуется полным совмещением конденсаторного и динамического торможения при подаче выпрямленного тока сразу после отключения двигателя от сети. В этом случае процесс торможения состоит фактически только из двух режимов: многократного магнитного и динамического торможений. Конденсаторы периодически восстанавливают магнитный поток машины. Статическая тормозная характеристика на первой ступени торможения может существовать только при большом добавочном сопротивлении в цепи выпрямленного тока.

Возможность построения тормозного устройства по одному из сформулированных выше принципом реализации КДТ, как и характер процесса торможения, зависит от типа и способа подключения конденсаторов, а также источника выпрямленного тока. При конденсаторно-динамическом торможении применяют те же типы конденсаторов, что и при других способах конденсаторного торможения: бумажные, металлобумажные и электролитические. Сохраняются и два способа их подключения: глухое и после отключения двигателя от сети. Для электролитических конденсаторов возможен только второй способ.

Источниками возбуждающего тока могут быть одно- и двухполупериодные выпрямители, а также генератор постоянного тока. Применение однополупериодного выпрямленного тока из-за малой эффективности торможения целесообразно только в отдельных случаях. Генераторы постоянного тока в приводах станков не применяют, поэтому наиболее типичным является использование двухполупериодных выпрямителей.

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Основной схемой реализации КДТ является схема с глухим подключением конденсаторов (см. рис. 33), условно называемая схемой КДТ-I. Отсутствие добавочных резисторов в цепи выпрямленного тока позволяет получить максимальное значение последнего при данной мощности источника. В зависимости от схемы управления тормозной режим может осуществляться по одному из двух сформулированных выше принципов.

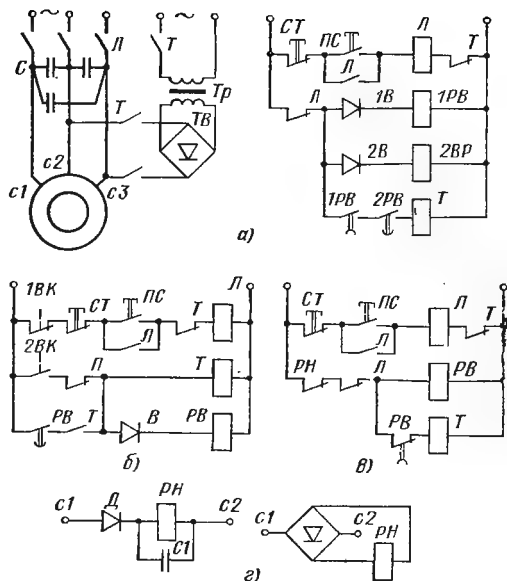
Рис. 36. Схема КДТ-1 и цепи управления для реализации торможения по первому и второму принципам

Для осуществления конденсаторно - динамического торможения по первому принципу рекомендуются схемы управления, приведенные на рис. 36, а—в. Для инерционных приводов любой мощности с мало изменяющимся в процессе торможения моментом нагрузки управление подачей выпрямленного тока может производиться в функции времени (рис. 36, а). Электромагнитное

(или любое другое) реле времени $1PB$ настраивается так, чтобы контактор T включался после окончания конденсаторного торможения при скорости привода, равной $\omega_{гк.н.}$ Реле времени $2PB$ отключает контактор T после остановки привода. Для повышения точности остановки при меняющемся статическом моменте подачу выпрямленного тока лучше производить в функции пути с помощью конечных выключателей $1BK$ и $2BK$ (рис. 36, б), кратковременно переключающих свои контакты, а отключать в функции времени.

Подача выпрямленного тока в функции напряжения на зажимах статора (рис. 36, в) позволяет поддерживать оптимальную настройку схемы при любых колебаниях нагрузки и инерционных масс. Реле напряжения RH (рис. 36, г) с параллельно включенным конденсатором включается на зажимы статора через диод D . Для повышения точности работы реле RH лучше применять двухполупериодный выпрямитель без конденсатора. Для еще большей точности реле RH можно включать так же, как показано на схеме рис. 32. Процесс торможения по схемам КДТ-1 происходит плавно, без ударов и вибраций (см. рис. 34, б).

Реализация конденсаторно-динамического торможения по второму принципу с частичным перекрытием режимов возможно за счет соответствующей настройки реле времени или реле напряжения. Такие схемы условно называют схемами КДТ-2, их используют для эффективного торможения инерционных приводов.



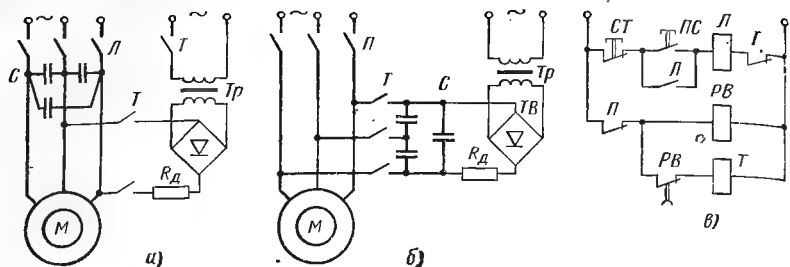


Рис. 37. Схемы реализации конденсаторно-динамического торможения по третьему принципу:
а — схема КДТ-3; б — схема КДТ-4; в — схема цепей управления

Введение в цепь выпрямленного тока добавочного резистора позволяет реализовать третий принцип построения КДТ с полным совмещением режимов. Схему такого торможения (рис. 37, а) условно называют схемой КДТ-3. Схема управления в этом случае отличается исключительной простотой, поскольку включение контактора T (рис. 37, в), подающего выпрямленный ток, производится размыкающим контактом контактора $Л$ сразу после его отключения. Схема имеет минимальное число аппаратов, а если не требуется отключения выпрямителя после остановки двигателя, то исключение реле времени еще более повышает ее надежность и простоту. Тормозной процесс в схемах КДТ-3 протекает так, как показано на осциллограммах рис. 35, б, в, и сопровождается значительными пиками тормозного момента одного знака. Эту схему можно применять для эффективного торможения электроприводов любой мощности и любых параметров.

Схема КДТ-4 (рис. 37, б) позволяет реализовать тормозной процесс также по третьему принципу с полным перекрытием режимов. Подключение конденсаторов вместе с источником выпрямленного тока позволяет выбирать их на меньшее номинальное напряжение, что уменьшает размеры и стоимость тормозного устройства. Тормозной момент, как и в схеме КДТ-3, содержит переменную составляющую, не меняющую общего знака момента.

Увеличение сопротивления резистора R_d в схемах КДТ-3 и КДТ-4 уменьшает пики ударных моментов магнитного торможения и делает торможение более плавным. Соответственно при сохранении величины выпрямленного тока увеличиваются потери энергии. Оптимальная эффективность торможения достигается в схеме КДТ-4 при относительно большей величине сопротивления R_d и соответственно меньших пиках момента, чем в схеме КДТ-3. Схему КДТ-4 можно рекомендовать для эффективного торможения инерционных приводов при необходимости ограничения величины ударных тормозных моментов.

В схеме КДТ-4 возможно использование электролитических конденсаторов, что резко снижает массу, объем и стоимость как блока конденсаторов, так и всего тормозного устройства. Особенности применения в тормозных устройствах полярных электролитических конденсаторов рассмотрены ниже, там же описаны особенности тормозного процесса в такой схеме, которую в этом случае условно называют схемой КДТ-5. Здесь следует только отметить, что возможными ограничениями для применения схемы КДТ-5 могут быть частота торможений, определяющая степень нагрева электролитических конденсаторов, и нестабильность свойств этих конденсаторов.

Во всех приведенных схемах управления предусматривается механическая блокировка контакторов L и T . Если по условиям эксплуатации время подачи выпрямленного тока в обмотки двигателя не ограничивается, то из схем управления можно исключить реле времени, отключающие тормозной контактор T после остановки двигателя. Для двигателей малой мощности в схемах КДТ-3 вместо тормозного контактора T возможно использовать размыкающие блок-контакты линейного контактора.

Для сравнительной оценки основных схем КДТ в табл. 2 приведены некоторые усредненные данные, полученные экспериментально при испытаниях нескольких четырехполюсных двигателей серии А2 мощностью 1,5—4 кВт. Во всех схемах величина симметрично подключаемой к каждой фазе емкости составляла $8 C_n$, а величина выпрямленного тока $1,5 I_n$. Суммарный приведенный момент инерции больше четырехкратной величины момента инерции ротора двигателя, а статический момент меньше 0,1 номинального. Величины пути и времени торможения получены как средние из ряда измерений. За базовые величины приняты показатели для схемы КДТ-3 с конденсаторами КМ2-0,5 как наиболее просто реализуемой и достаточно эффективной. Для сопоставления приведены данные противотокового и динамического торможения.

Из данных табл. 2 следует, что все схемы, кроме КДТ-1, обеспечивают эффективность торможения, равную либо близкую эффективности противотокового торможения. Отсутствие переходных знакопеременных и пиковых пульсирующих моментов при торможении по схеме КДТ-1 сообщает ей свойства высокой точности, повторимости и плавности, в несколько раз превышающие аналогичные показатели для других схем. Очень важно правильно выбирать схему для наиболее рационального решения поставленной задачи. Например, применение схемы КДТ-4 вместо схемы КДТ-3 уменьшает объем и стоимость конденсаторов 2 раза.

Важным техническим показателем качества схемной реализации является надежность тормозного устройства. Поскольку абсолютные величины интенсивностей отказов элементов тормозного устройства значительно изменяются в зависимости от

Результаты испытаний процесса конденсаторно-динамического торможения двигателя серии А2

Схема торможения	Время торможения (среднее)		Путь торможения (средний)		Отклонение времени н пути от среднего значения, %	Потери в двигателе, %	Конденсаторы		Максимальный пик момента M/M_n	Характер тормозного момента
	с	%	оборо- ты	%			Тип	Объем, %		
КДТ-3	0,65	100	5,0	100	Не более $\pm 6,0$	100	КМ2-0,5 МБГЧ	100 60	14	Ударный однозначный с повторяющимися умень- шающимися пиками
КДТ-1	2,53	390	20,3	420	Не более $\pm 2,0$	65	МБГЧ	60	6	Плавное убывающий
КДТ-2	0,50	77	4,5	90	Не более $\pm 6,0$	85	МБГЧ	60	15	Плавное убывающий с пи- ком момента магнитного торможения
КДТ-4	0,54	82	4,2	84	Не более $\pm 6,0$	80	КМ1-0,22 КБГ-МН, 400 В	58 60	8	Ударный однозначный с повторяющимися умень- шающимися пиками
КДТ-5	0,60	91	4,7	94	Не более $\pm 6,0$	80	КЭ-2-М, 450 В	3	7	Ударный однозначный с повторяющимися умень- шающимися пиками
Противотокового	0,40	61	4,2	84	Не менее $\pm 8,0$	400	—	—	16	Знакопеременный
Динамического	2,08	320	27,6	550	Не более $\pm 5,0$	100	—	—	6	Знакопеременный в начале торможения, затем плав- но убывающий

источника информации, то ценность представляют только сравнительные данные. Если за единицу принять надежность схемы КДТ-3, для которой расчетная наработка на отказ равна 580 ч при 60 включениях в час и 94 ч при 400 включениях в час при условии трехсменной работы в течение года (6000 ч), то относительная вероятность отказов для схем КДТ-1, КДТ-2 равна 1, а для схем КДТ-4 и КДТ-5 изменяется от 1,01 до 1,03. Все схемы КДТ вместе с тем имеют меньшую вероятность отказов, чем схемы противотокового торможения, и в них полностью отсутствует вероятность реверса.

Для более полной оценки основных схем КДТ можно привести также данные об их сравнительной экономичности. Если за единицу взять годовые приведенные затраты с учетом показателей надежности на схему КДТ-5 с электролитическими конденсаторами, то сравнительная экономичность остальных схем ниже в 1,25 раза при 60 включениях в час, а при 400 включениях в час всего в 1,05 раза.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КДТ

Имеющиеся данные об использовании КДТ в отечественной промышленности и за рубежом позволяют заключить, что этот способ имеет практически неограниченную область применения. КДТ применяют для асинхронных двигателей большого диапазона мощностей. Преимущественно КДТ применяют в инерционных приводах станков с двигателями мощностью до 10 кВт, работающих с большим числом включений, для которых необходимо обеспечить эффективное торможение или точную остановку.

Эффективность торможения определяется не только схемой, но и емкостью подключаемых конденсаторов, а также величиной выпрямленного тока. Рациональные величины емкости (в плече треугольника) должны быть равны $6-8 C_n$, а тока примерно $1,5 I_n$. Нижний предел емкости диктуется величиной тормозного эффекта, при котором вообще целесообразно применять конденсаторы, верхний — технико-экономическими соображениями, сводящимися к следующему. При величинах емкости $8 C_n$ и тока $1,5 I_n$ в схемах КДТ-2, КДТ-3 и КДТ-4 получается эффективность торможения, равная той, которая обеспечивается наиболее эффективным противотоковым торможением. Дальнейший рост емкости приводит к пропорциональному возрастанию габаритных размеров и стоимости конденсаторной батареи, в то время как прирост тормозного эффекта становится незначительным. Увеличение эффективности торможения при величине емкости $8 C_n$ возможно достичь и за счет дальнейшего увеличения тока, что связано с ростом тепловых потерь в двигателе. Увеличение же емкости до $8 C_n$ потерь в двигателе практически не повышает.

Максимально возможная эффективность торможения при данных величинах емкости и тока зависит также от сопротивлений резисторов в схемах КДТ-3, КДТ-4 и КДТ-5, а также от настройки реле времени или напряжения в схеме КДТ-2. Рекомендуемым значением сопротивления резистора в схеме КДТ-3 является величина $0,1-0,2 R_H$. Большее значение относится к двигателям большего габаритного размера. Применять добавочный резистор в схеме КДТ-3 следует только при работе с выпрямителями, имеющими малое внутреннее сопротивление (кремниевые, германиевые). При использовании селеновых выпрямителей резистор можно не вводить. Оптимальные величины сопротивлений резисторов в схемах КДТ-4 и КДТ-5 при величине емкости $4-8 C_H$ составляют соответственно $0,8-0,6 R_H$.

Потери в двигателе при КДТ определяются суммой потерь при конденсаторном и динамическом торможении. При точном их определении нужно учитывать особенности реализации режима по конкретным схемам. С достаточной для инженерной практики точностью эти потери за одно торможение (до остановки двигателя) можно определять по следующим выражениям, справедливым при условии, что торможение начинается при частоте вращения двигателя, близкой к синхронной:

для схем КДТ-1 и КДТ-2

$$W_T = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} [1 + (\omega_{гн}^D)^2] \text{ Дж}; \quad (26)$$

для схемы КДТ-3

$$W_T \approx J_{\Sigma} \omega_0^2 \text{ Дж}; \quad (27)$$

для схем КДТ-4 и КДТ-5

$$W_T = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \left[2 - \frac{1 - (\omega_{гн.н}^D)^2}{1 + k_2} \right] \text{ Дж}, \quad (28)$$

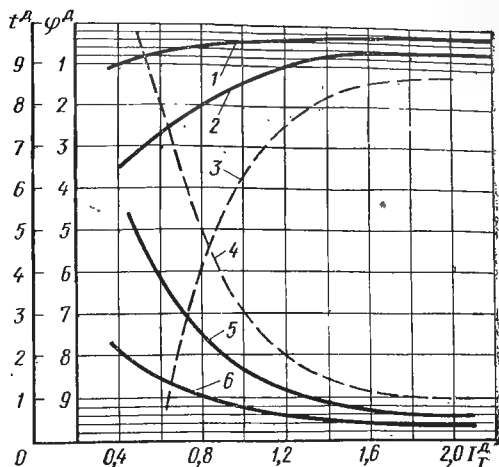
где $\omega_{гн}$ — скорость вращения ротора, при которой подается выпрямленный ток; k_2 — коэффициент, учитывающий выделение энергии в дополнительном резисторе, при емкости, равной $4-8 C_H$, соответственно $k_2 = 0,4-1,0$.

Время и путь торможения в долях от базовых при выбранных по приведенным выше рекомендациям величинах емкости и тока для основных схем КДТ можно определить с помощью универсальных характеристик, приведенных на рис. 38 и справедливых для приводов с двигателями серии А2 и 4А от 2 до 5 габаритов при J_{Σ} , изменяющемся от двукратной до пятикратной величины момента инерции ротора двигателя:

$$\left. \begin{aligned} t_6 &= \frac{J_{\Sigma} \omega_0 I_H}{M_H I_{0H}} \text{ с}; \\ \varphi_6 &= \frac{\omega_0 t_6}{4\pi} \text{ об}, \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

рис. 38. Графики для определения углового пути φ^d (1, 2, 3) и времени t^d (4, 5, 6) конденсаторно-динамического торможения при различных величинах емкости C^d подключенных конденсаторов в зависимости от величины возбуждающего тока I_T^d (все величины даны в относительных единицах):

1, 6 — при $C^d = 8$; 2, 5 — при $C^d = 4$; 3, 4 — при $C^d = 0$



где J_{Σ} — суммарный приведенный момент инерции данного привода, кг·м²; M_H — номинальный момент двигателя, Н·м; $I_H, I_{он}$ — ток двигателя соответственно номинальный и номинальный холостого хода, А.

Статический момент принимают равным нулю. Штриховой линией на рис. 38 показаны кривые для чистого динамического торможения ($C^d = 0$).

В других случаях расчеты нужно выполнять с учетом переходных моментов, что возможно при использовании ЭВМ. Только при торможении инерционных приводов по схеме КДТ-1 расчеты можно производить по статическим характеристикам конденсаторного и динамического торможения. В табл. 3 приведены краткие рекомендации по применению основных схем КДТ.

СХЕМЫ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ КДТ

Наряду с основной группой схем КДТ на практике применяют большое число схем, решающих отдельные частные задачи. Некоторые из наиболее удачных целесообразно рассмотреть. Динамическое торможение при питании однополупериодным выпрямленным током малоэффективно из-за наличия гармонической составляющей тока основной частоты, из-за чего двигатель развивает в зоне высоких скоростей двигательный момент и при малой нагрузке вообще не останавливается. Вместе с тем схема выпрямления привлекает простотой реализации, особенно если применяют управляемый диод. Применение конденсаторов делает возможным торможение и в этом случае при любом статическом моменте.

Схема КДТ-6 (рис. 39) с однополупериодным выпрямлением тока принципиально допускает реализацию всех трех принци-

Рекомендации по применению основных схем КДТ

Схема	Принцип построения	Достоинства	Основные недостатки	Область применения
КДТ-1 (см. рис. 36)	Последовательное действие режимов	Высокая повторяемость пути и времени торможения. Наименьшие потери в двигателе при торможении. Наименьшее число вентиля	Меньшая эффективность торможения, чем в других схемах. Сложность целей управления	Эффективная, плавная и точная остановка приводов с произвольным моментом инерции
КДТ-2 (см. рис. 36)	Перекрытие режимов	Высокая эффективность торможения. Малое число вентиля	Сложность целей управления	Эффективное торможение инерционных приводов при недопустимости значительных ударов в передачах
КДТ-3 (см. рис. 37, а)	Полное наложение режимов	Высокая эффективность торможения. Простота схемы управления	Ударный характер момента	Эффективное торможение инерционных приводов при допустимости ударного характера тормозного момента
КДТ-4 (см. рис. 37, б)	То же	Высокая эффективность торможения. Простота схемы управления. Уменьшенный объем конденсаторов	Повышенный расход энергии из-за потерь в большом сопротивлении резистора	Эффективное торможение инерционных приводов при недопустимости больших ударных тормозных моментов
КДТ-5 (см. рис. 37, б)	»	То же, что КДТ-4, но еще меньший объем и стоимость электролитических конденсаторов	Изменение эффективности торможения со временем. Ограниченность частоты торможений тепловым режимом конденсаторов	Эффективное торможение приводов при недопустимости больших ударных моментов, жестких требованиях к объему, массе и стоимости тормозного устройства

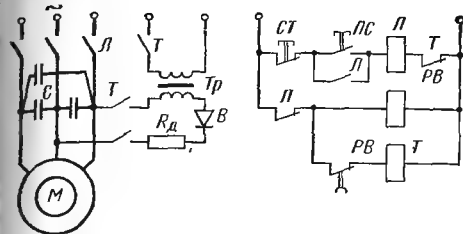


Рис. 39. Схема КДТ-6 с однополупериодным выпрямителем.

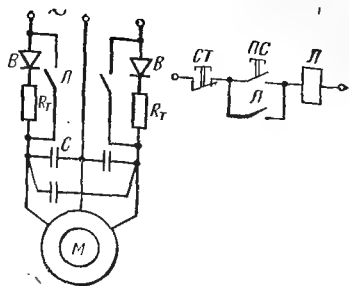


Рис. 40. Схема КДТ-7

пов построения КДТ. Однако наиболее рациональным следует в данном случае считать третий. Это соответственно отражено в приведенной схеме цепей управления. Для двигателей небольшой мощности оказаться рациональным увеличение сопротивления резистора R_d и отказ от трансформатора, что еще больше упрощает тормозное устройство и снижает пики момента.

Разработанная в СКБ ЗШ и ЗС схема, условно называемая далее КДТ-7 (рис. 40), предназначена для торможения малоинерционных приводов малой мощности с большим числом включений, когда длительность управляющего импульса соизмерима со временем срабатывания аппаратуры управления и временем торможения [11]. Отключение контактора Л переводит двигатель в тормозной режим, а включение — сразу же в двигательный. Схема построена по третьему принципу с полным совмещением режимов компонентов. Значительная величина сопротивления добавочных резисторов не только ограничивает повторяющиеся пики моментов, но и существенно снижает эффективность торможения. Повышение эффективности схемы может быть достигнуто при включении вентилей с переключением фаз. Однако в этом случае появляются значитель-

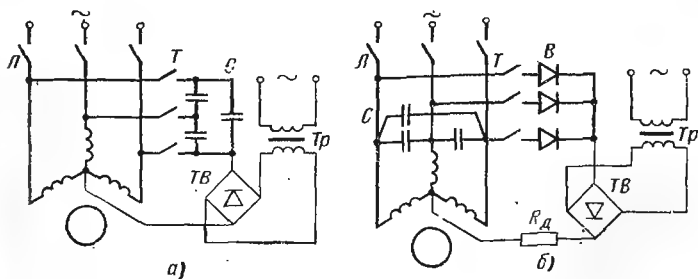


Рис. 41. Схемы КДТ-8 (а) и КДТ-9 (б)

ные знакопеременные моменты из-за изменения направления вращения поля от основной гармонической выпрямленного тока.

Схема КДТ-8 (рис. 41, а) позволяет применять электролитические конденсаторы в тех случаях, когда по условиям источника выпрямленного тока, например из-за ограниченности его мощности, нельзя включить добавочный резистор достаточного большого сопротивления, как это сделано в схеме КДТ-5. Отсутствие резистора приводит при подаче выпрямленного тока к преждевременному прекращению самовозбуждения машины, что значительно снижает тормозной эффект. Подключение в этом случае выпрямителя только к одной фазе увеличивает зону конденсаторного торможения и при равной мощности источника тока, а следовательно, одинаковой мощности потерь в обмотках машины повышает эффективность торможения на 25—30%. Наиболее рациональным принципом построения схемы следует считать третий.

В тех случаях, когда повторяющиеся пики тормозного момента, свойственные всем схемам КДТ, построенным по третьему принципу, являются недопустимыми по условиям работы приводимого механизма, может быть рекомендована схема КДТ-9 (рис. 41, б). Симметричное подключение источника выпрямленного тока к обмоткам двигателя позволяет существенно улучшить качество тормозного процесса при совмещении режимов. Хотя в тормозном моменте и содержится переменная составляющая утроенной частоты, однако амплитуда ее невелика, изменение момента происходит плавно без заметных всплесков и сопутствующих им возможных ударов в кинематических цепях станка. Схема допускает построение и по второму принципу. В этом случае дополнительный резистор R_d и выпрямитель TB следует исключить. Возникающее при включении контактора T симметричное короткое замыкание создает дополнительную ступень торможения, которое теперь превращается в трехступенчатое КМДТ, что повышает точность торможения за счет более высокой повторимости пути и времени торможения.

Данные для сравнительной оценки рассмотренных вариантов схем КДТ приведены в табл. 4. Все величины приведены в процентах относительно приведенных ранее в табл. 2 данных схемы КДТ-3. Во всех схемах емкость конденсаторов, как и раньше, равна $8 C_n$, а величину выпрямленного тока определяли по условию равенства мощности потерь в обмотках двигателя при включении их по данной схеме. Принцип построения для всех схем — третий с полным совмещением режимов. Остальные условия те же, что и для основных схем.

Характерным для схем этой группы является существенное снижение эффективности торможения, которая остается все же выше, чем у динамического торможения. Рассмотрен-

Таблица 4

Сравнительные данные схем КДТ, %

Схема тормо- жения	Время тормо- жения	Путь тормо- жения	Отклонение времени и пути от среднего значения	Объем схемы	Максимальный пик момента, %	Характер тормозного момента
КДТ-6	155	111	Не более $\pm 20,0$	85	100	Повторяющиеся пики од- ного знака
КДТ-7	400	260	Не более $\pm 10,0$	90	48	Знакопеременный
КДТ-8	174	194	Не более $\pm 6,0$	55	34	Повторяющиеся пики од- ного знака
КДТ-9	188	160	Не более $\pm 6,0$	120	37	Плавнорубающийся с пульсациями одного зна- ка

ные варианты схем иллюстрируют возможности этого способа торможения с точки зрения управления как его эффективностью, так и характером тормозного процесса.

В качестве примера удачного применения КДТ можно привести схему привода шпинделя алмазно-расточного станка ОС-1279А с двигателем АО2-32-6, разработанную в ОСКБ АРС. Для безрисочного вывода резца из обрабатываемой детали привод шпинделя должен обеспечивать остановку резца в определенном положении. Поскольку приведенный момент инерции шпинделя к валу двигателя примерно в 15 раз превышает величину момента инерции ротора, то любой вид одноступенчатого торможения не обеспечивает необходимой точности останова резца. Применение КДТ позволяет решить эту задачу.

Упрощенная схема торможения шпинделя алмазно-расточного станка приведена на рис. 42. В качестве датчика скорости шпинделя и положения резца применен бесконтактный выключатель БВК-24, включаемый сектором К, закрепленным на валу шпинделя. Датчик БВК питается стабилизированным напряжением. Выход датчика подключен к реле РП, обмотка которого зашунтирована конденсатором С2. Когда сектор входит в БВК, включается реле РП и заряжается конденсатор С2. После включения БВК реле РП удерживается током разряда этого конденсатора. При большой скорости привода и, следовательно, высокой частоте импульсов от БВК реле РП нахо-

ра, близкой к нижней критической $\omega_{г.к.н.}$, при которой исчезает тормозной момент, магнитный поток двигателя сохраняет постоянную величину, значительно превышающую номинальную. Поэтому если магнитное торможение на второй ступени реализуется при скорости вращения большей $\omega_{г.к.н.}$, то его эффект проявляется в полной мере и обеспечивает интенсивную остановку привода. Следовательно, на первом этапе конденсаторное торможение не только поглощает основную часть кинетической энергии вращающихся масс привода, но и обеспечивает высокую эффективность второй ступени — магнитного торможения. Достоинствами этого способа торможения являются весьма высокая эффективность, минимальная величина греющих двигатель потерь энергии, простота реализации и надежность.

Для осуществления КМТ необходимо после отключения двигателя от сети вместе с глухо подключенными к обмоткам статора конденсаторами замкнуть цепь статора накоротко или на небольшое сопротивление. После отключения двигателя на первом этапе под действием конденсаторного торможения скорость привода быстро снижается. Характер и интенсивность тормозного процесса зависят от величины возбуждающей емкости и инерционных масс привода. Характер тормозного процесса на втором этапе остается неизменным, а эффективность его в значительной степени зависит от начальных электромагнитных условий, инерционности привода и сопротивления цепи статора. Начальные условия характеризуются величиной магнитного потока и скоростью вращения ротора, которая, в свою очередь, определяется параметрами режима конденсаторного торможения в момент замыкания цепи статора.

Осциллограммы КМТ двигателя АО2-41-4, работавшего до отключения от сети вхолостую с приведенным суммарным моментом инерции привода в 2,6 раза больше момента инерции ротора, представлены на рис. 43. После отключения от сети двигателя с глухо подключенным симметричным конденсатором емкостью $6 C_n$ происходит конденсаторное торможение. Замыкание накоротко цепи статора после полного окончания конденсаторного торможения при скорости вращения меньше $\omega_{г.к.н.}$ малоэффективно и не дает быстрой полной остановки (осциллограмма рис. 43, а). Замыкание статора при скорости вращения несколько большей $\omega_{г.к.н.}$ (рис. 43, б) резко увеличивает эффективность второй ступени, обеспечивая полную остановку привода за 0,04 с. По мере дальнейшего сокращения длительности первой ступени возрастают цикл тока и момента при замыкании цепи статора на второй ступени. Возрастает соответственно и эффективность магнитного торможения, которая остается высокой даже при уменьшении возбуждающей емкости до величины $4 C_n$ (рис. 43, в).

Для двигателей небольшой мощности применением быстродействующей аппаратуры длительность первого этапа может

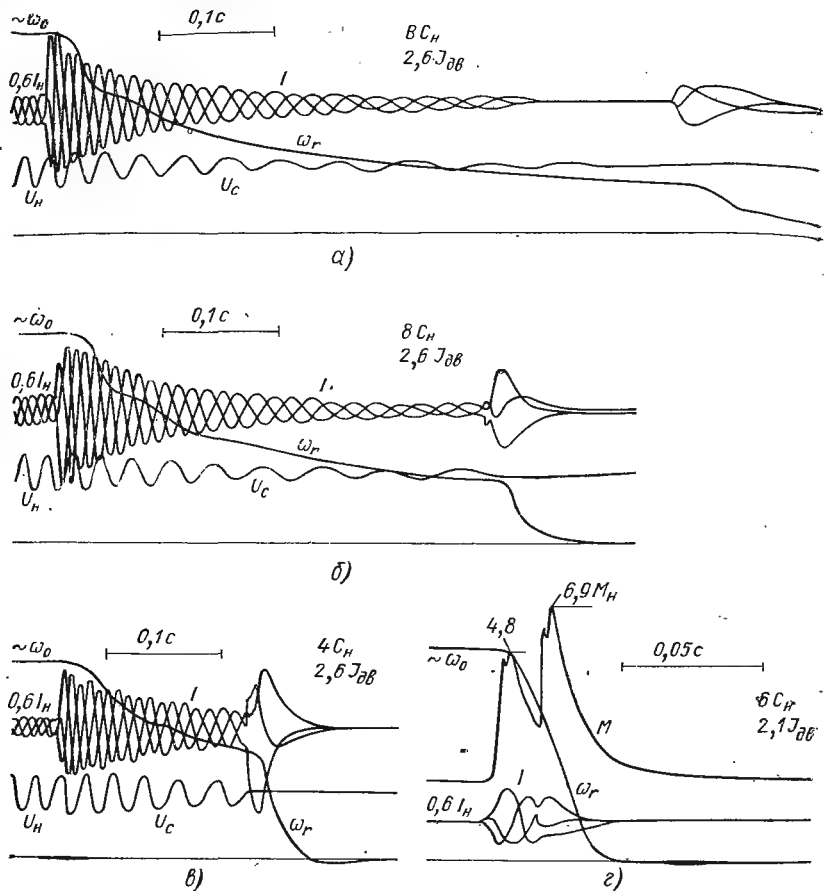


Рис. 43. Осциллограммы конденсаторно-магнитного торможения двигателя АО2-41-4 (а, б, в) и АО2-31-4 (г)

быть сведена к сотым долям секунды и обеспечена практически мгновенная остановка двигателя. Осциллограмма рис. 43, г, снятая при торможении двигателя АО2-31-4, работавшего вхолостую с суммарным приведенным моментом инерции в 2,1 раза больше момента инерции ротора, показывает возможности этого способа торможения, обеспечивающего полную остановку двигателя за 0,56 оборота его вала в течение 0,045 с. Эта же осциллограмма показывает и характер изменения тормозного момента. В этом случае нельзя считать, что при КМТ имеет место простая сумма тормозных эффектов двух способов торможения. Здесь конденсаторное торможение не только действует на первой ступени, но и значительно повышает эффективность магнитного торможения на второй ступени. Следует

отметить, что с увеличением емкости конденсаторов значительно растут пики тормозных моментов при замыкании цепи статора на второй ступени. Эти пики могут превышать номинальный момент двигателя в 12—15 раз, примерно вдвое превосходя соответствующие пики при обычном магнитном торможении с номинальной величиной магнитного потока.

Основной задачей второго этапа торможения является поглощение всей кинетической энергии, запасенной вращающимися массами привода при скорости, соответствующей началу этапа. Величина поглощаемой энергии пропорциональна квадрату магнитного потока и зависит как от начальной скорости этапа, так и суммарного момента инерции привода. Время торможения на втором этапе составляет 0,02—0,04 с, поэтому суммарное время торможения определяется в основном длительностью первого этапа. На рис. 44 приведены типовые графики изменения кинетической энергии W_k вращающихся масс привода в процессе конденсаторного торможения для разных величин возбуждающей емкости и суммарного момента инерции привода. Штриховыми линиями нанесены графики изменения величины кинетической энергии $\Delta W_{м.т.}$, которая может быть поглощена магнитным торможением на втором этапе при начальных условиях, определяемых конденсаторным. Графики показывают, что увеличение возбуждающей емкости повышает эффективность как первого, так и второго этапа торможения. Данному моменту инерции привода соответствует некоторая минимальная величина емкости, обеспечивающая полную остановку привода на втором этапе торможения. При емкости, например $2 C_n$, кривая W_k проходит выше кривой $\Delta W_{м.т.}$, и, следовательно, полная остановка привода на втором этапе вообще недостижима.

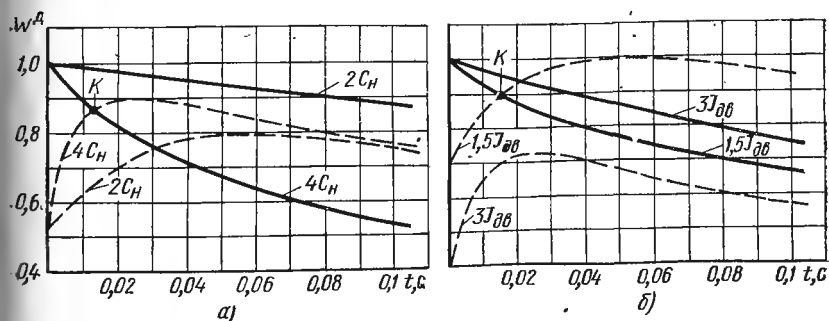


Рис. 44. Графики изменения кинетической энергии W_k (сплошная линия) привода и ее части $\Delta W_{м.т.}$ (штриховая линия), которая может быть поглощена на втором этапе торможения в зависимости от емкости при $J_{\Sigma} = 2,1 J_{дв}$ (а) и от момента инерции привода при величине возбуждающей емкости, равной $3 C_n$ (б)

Увеличение емкости уменьшает кинетическую энергию привода и увеличивает магнитный поток двигателя в конце первого этапа торможения. При емкости $4 C_H$ кривые W_K и $\Delta W_{м.т}$ пересекаются в точке K , после которой $\Delta W_{м.т}$ остается все время больше W_K . Это значит, что начало второго этапа торможения после точки пересечения K всегда обеспечивает полную остановку привода. Максимальная эффективность при минимальном времени достигается, если замыкание статора производится в точке пересечения. Для малоинерционных приводов станков оптимальная величина емкости для получения эффективной остановки составляет $3-4 C_H$. Графики, составленные для двигателя АО2-31-4, являются типичными. Им можно пользоваться для четырех- и шестиполусных двигателей единой серии первого, второго и третьего габаритов. На графиках кинетическая энергия выражается в долях энергии, запасаемой приводом при синхронной скорости вращения ротора.

Увеличение момента инерции делает необходимым увеличение возбуждающей емкости. При постоянной емкости изменение момента инерции привода в ограниченных пределах незначительно изменяет длительность первой ступени и, следовательно, мало отражается на общем времени торможения. Наличие даже небольшого статического момента нагрузки снижает величину кинетической энергии, которая должна быть поглощена на втором этапе; и позволяет поэтому уменьшать величину возбуждающей емкости. Изменение величины статического момента во время торможения практически не отражается на времени торможения, поскольку длительность магнитного торможения на второй ступени остается постоянной. Таким образом, при заданной длительности первой ступени общее время торможения мало зависит от изменений нагрузки и момента инерции привода. Эффективность торможения не зависит и от колебаний величины напряжения сети. Следовательно, КМТ присуща высокая стабильность торможения, зависящая практически только от разброса времени срабатывания аппаратов управления. При применении быстродействующей станочной электроаппаратуры при колебаниях напряжения сети на $\pm 20\%$, момента инерции и нагрузки на $\pm 50\%$ погрешность в отработке пути не превышает $\pm 5\%$, а во времени торможения $\pm 10\%$.

КМТ является самым экономичным из всех существующих способов электрического торможения, поскольку тормозной процесс происходит без потребления энергии из сети. Возбуждение тормозного режима происходит за счет энергии, запасенной электрическим полем конденсаторов (первая ступень) и магнитным полем двигателя (вторая ступень). Энергия, рассеиваемая в самом двигателе, лишь немного превышает величину кинетической энергии привода в начале торможения.

После окончания торможения обмотки двигателя не обтекают ток и они не греются, поэтому нагрев обмоток двигателя за время торможения невелик и допустимое число торможений в единицу времени примерно вдвое больше, чем при динамическом торможении.

Торможение реализуется исключительно просто с минимальным числом аппаратов управления и поэтому отличается высокой надежностью. После окончания магнитного торможения на второй ступени тормозной момент исчезает полностью и ничто не препятствует свободному провороту вала двигателя.

СХЕМЫ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ КМТ

Типичная схема включения двигателя для реализации КМТ (рис. 45, а) вместе со схемой управления, позволяющей изменять длительность интервала времени между отключением двигателя от сети и включением контактора T , замыкающего накоротку статорную цепь двигателя (рис. 45, б), является одной из самых сложных. Управление длительностью первой ступени торможения производится в функции времени с помощью реле PB . Принцип управления контактором T , включение которого осуществляет переход от первой ступени торможения ко второй, одинаковый при КДТ и КМТ. В последнем случае только не нужно отключать контактор T после окончания торможения. Возможно управление и в функции пути и

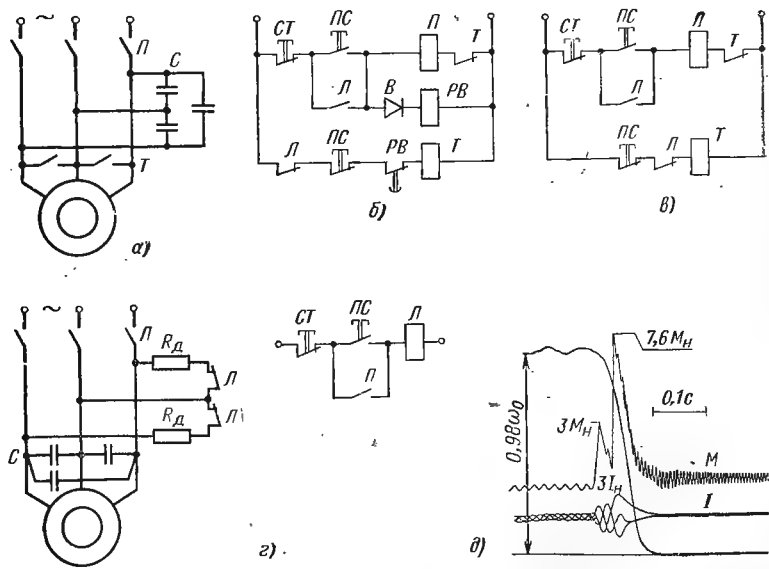


Рис. 45. Основные схемы реализации КМТ

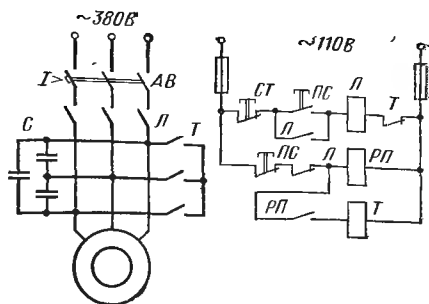
скорости (напряжения на статоре) по схемам, аналогичным приведенным на рис. 36.

В тех случаях, когда не требуется управление длительностью первой ступени, а необходимо получить наиболее быструю остановку малоинерционного привода, можно исключить реле времени и включать контактор T размыкающим блок-контактом линейного контактора по схеме, приведенной на рис. 45, в. Для многих приводов небольшой мощности (до 1—1,5 кВт) с приведенным моментом инерции меньше 0,5 момента инерции ротора с успехом можно применять простую схему с замыканием статорной цепи двигателя размыкающими контактами линейного контактора L (рис. 45, г). При применении быстродействующих аппаратов (типов ПМО, ПМЕ, РПК и др.) замыкание размыкающих контактов может произойти до разрыва дуги на размыкающихся замыкающих контактах. В этом случае для предотвращения обгорания контактов последовательно с ними включают резисторы, сопротивление которых выбирают по допустимому току контактов, но не больше 1,2—1,4 сопротивления короткого замыкания двигателя. На рис. 45, д приведена осциллограмма торможения по этой схеме малоинерционного привода. Двигатель АО41-6 мощностью 1 кВт тормозился при величине суммарного приведенного момента инерции, равного 1,15 момента инерции ротора, и статического момента меньше 0,15 номинального с глухо подключенной симметричной емкостью 3×35 мкФ (3,8 C_n). Время торможения 0,05 с, тормозной путь 0,4 оборота вала.

В схемах КМТ с быстродействующей аппаратурой необходимо обращать внимание на правильную регулировку замыкающих и размыкающих контактов аппаратов. При включении аппарата сначала должны размыкаться размыкающие контакты, а затем замыкаться замыкающие. При отключении — наоборот, сначала размыкаться замыкающие, а затем замыкаться размыкающие. При неправильной последовательности работы контактов возможно обгорание контактов, замыкающих статорную цепь, если вторая ступень торможения начинается сразу после отключения двигателя от сети без промежуточного интервала времени. Однако в отличие от динамического и конденсаторно-динамического торможения выход из строя двигателя при нарушении работы аппаратов управления исключается, что является важным преимуществом этого способа для станочных асинхронных приводов небольшой мощности.

Применение резисторов целесообразно и в тех случаях, когда следует ограничивать пики момента на второй ступени торможения без снижения его эффективности, как это рассматривалось при описании свойств магнитного торможения. В этом случае резисторы выбирают по приведенным выше рекоменда-

рис. 46. Схема КМТ привода шлифовальной бабки резбошлифовального станка



циям и подключают тормозным контактором. Изменяя величину времени торможения на первой ступени и величину сопротивления резисторов, можно в широких пределах управлять процессом торможения, переходя от режима интенсивной остановки к режиму плавного торможения с последующей точной остановкой. В последнем случае управление тормозным контактором целесообразнее производить в функции величины напряжения на статоре (или пути), подбирая параметры так, чтобы замыкание цепи статора происходило при скорости вращения несколько большей $\omega_{т.н.}$

В качестве примера применения КМТ для повышения надежности станочного привода на рис. 46 приведена упрощенная схема управления приводом подвода и отвода шлифовальной бабки, применяющаяся на некоторых резбошлифовальных станках [4]. Схема подобна приведенной выше типовой схеме, но для облегчения работы контактов контактора T они включены звездой, а для исключения возможности даже кратковременного переключения контактов линейного и тормозного контакторов при их разрегулировке, что может привести к короткому замыканию, в схему введено промежуточное реле РП. Эта схема применена взамен схемы динамического торможения, при которой длительность включения выпрямленного тока определялась реле времени, которое приходилось регулярно проверять и настраивать. При уменьшении выдержки времени этого реле торможение прекращалось преждевременно и нарушалась работа механизма, а при увеличении (больше чем на 5 с) выдержки времени перегревался и выходил из строя двигатель. Замена способа торможения исключила выход из строя двигателя и резко сократила нарушения работы механизма из-за отказа тормозного устройства.

Точный расчет тормозного процесса при КМТ и определение оптимальных параметров тормозного устройства при заданных параметрах привода возможны, как и для других комбинированных способов торможения, только с применением ЭВМ. Для приближенного подбора параметров можно использовать следующую упрощенную методику.

Емкость и время торможения на первой ступени для большинства приводов станков можно подбирать по графикам, приведенным на рис. 44. Оптимальная величина емкости для приводов с двигателями мощностью 2—10 кВт изменяется от

4 до 6 C_H . Для приводов мощностью до 4 кВт с приведенным моментом инерции механизма меньше 0,5 момента инерции ротора при торможении по схемам рис. 45, а, в, г оптимальная величина емкости составляет 3×40 мкФ на 1 кВт номинальной мощности двигателя при напряжении 380 В и соединении конденсаторов треугольником. Время торможения в этом случае определяется временем переключения контактов и длительностью второй ступени торможения, которую можно принимать равной 0,04 с при отсутствии существенного момента нагрузки на валу. При величине статического момента больше 0,5 номинального время торможения на второй ступени уменьшается до 0,02 с. Тормозной путь подсчитывают, исходя из прямолинейного закона уменьшения скорости. Этими же соображениями можно руководствоваться, когда параметры определяют по графикам на рис. 44.

Во всех остальных случаях, когда время конденсаторного торможения на первой ступени нужно увеличивать, можно считать, что если торможение на второй ступени начинается при скорости вращения больше $\omega_{г.к.н.}$, то за счет магнитного торможения будет поглощено не менее 60% кинетической энергии, запасенной ротором двигателя, вращающимся с синхронной скоростью. Следовательно, остановка привода на второй ступени будет обеспечена, если замыкание цепи статора будет произведено при скорости вращения меньше $\omega_{г.к.}$, определяемой выражением

$$\omega_{гк} = 0,75\omega_0 \sqrt{\frac{J_{дв}}{J_{\Sigma}}}, \quad (30)$$

где $\omega_{гк}$ и ω_0 — соответственно критическая и начальная частоты вращения, выраженные в 1/с или в относительных единицах; $J_{дв}$ и J_{Σ} — момент инерции ротора двигателя и суммарный приведенный момент инерции привода (включая ротор двигателя).

Параметры конденсаторного торможения и схемы управления подбирают так, чтобы вторая ступень начиналась при скорости вращения больше $\omega_{гк.н.}$ и меньше $\omega_{гк.}$. Время и путь второй ступени добавляют ко времени и пути первой ступени, которые рассчитывают по соображениям, изложенным в разделе «Конденсаторное торможение».

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА И РЕАЛИЗАЦИИ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ТОРМОЖЕНИЯ

Большое число возможных способов электрического торможения асинхронных электродвигателей приводов станков и многообразие возможных схемных решений значительно усложняют задачу выбора наиболее рационального тормозного устройства, делая решение ее неоднозначным. Выбор наиболее рационального в каждом конкретном случае способа торможения возможен только на базе сравнительной оценки их основных технико-экономических показателей. К таким показателям в первую очередь относятся эффективность торможения, характер изменения тормозного момента, допустимое число торможений в единицу времени, надежность и экономичность тормозного устройства. В некоторых случаях оказываются важными масса и габаритные размеры тормозного устройства.

Основные технические особенности всех способов торможения, характер изменения тормозного момента и величины потерь энергии в двигателе, определяющие допустимое число его включений, приведены в соответствующих разделах, поэтому здесь дано только краткое сопоставление основных технико-экономических показателей, позволяющее дать сравнительную оценку способов торможения применительно к приводу металлорежущих станков.

Основными критериями эффективности являются время торможения и величина тормозного пути. Между ними отсутствует однозначная зависимость, поскольку время торможения определяется средней величиной тормозного момента, а величина пути еще и характером его изменения. Иногда важным показателем оказывается стабильность этих величин, оцениваемая максимальным отклонением от среднего значения.

Эффективность всех способов торможения, за исключением противотокового и магнитного, зависит от величин возбуждающего тока и емкости подключенного конденсатора. Для комбинированных двух- и трехступенчатых способов имеет существенное значение настройка аппаратов схемы управления, а для малоинерционных приводов небольшой мощности собственное время срабатывания аппаратов, соизмеримое со временем торможения. С увеличением мощности двигателей,

их номинальной скорости и особенно суммарного момента инерции привода эффективность разных способов торможения меняется в разной степени. Исследования показали, что если критерии эффективности выражаются в относительных единицах, то их усреднение возможно для достаточно больших групп электроприводов. Удобство применения таких обобщенных показателей и их сопоставимость возрастают, если показатели одного из способов принимают за базовые. В качестве базового целесообразно принять наиболее эффективный из классических способов — противотоковое торможение.

Первую из больших групп приводов станков составляют приводы вспомогательных перемещений. Характерным для этой группы является относительно высокое число включений привода, небольшая мощность двигателей до 4 кВт (1, 2, 3 и 4 габариты единой серии в четырехполюсном исполнении), малый суммарный приведенный момент инерции привода, не превышающий двукратного момента инерции ротора двигателя (чаще всего равный $1,3\text{--}1,5 J_{\text{дв}}$). Для этой группы малоинерционных приводов относительная эффективность различных способов торможения характеризуется усредненными данными, приведенными в табл. 5, в которой за базовые приняты величины для ПТ.

Таблица 5

Показатели эффективности способов торможения для малоинерционных приводов (относительно ПТ)

Способ торможения	Время торможения	Тормозной путь	Отклонение времени и пути от средней величины ($\pm$)	
			не менее	не более
ПТ	1,0	1,0	0,15	—
ДТ	2,0	1,6	—	0,05
МДТ	1,0	0,6	—	0,05
КМТ	0,3	0,5	—	0,02
КДТ	0,8	0,5	—	0,03
КТ	1,0	0,5	—	0,04

Табл. 5 составлена по данным большого числа расчетов и экспериментов для двигателей, работающих вхолостую. Данные по КТ приведены для схемы с глухим подключением трехфазных конденсаторов емкостью $6 C_{\text{н}}$ и добавочным моментом от механического тормоза, равным $0,2 M_{\text{н}}$. Для ДТ, МДТ и КДТ величину выпрямленного тока принимали равной $1,22 I_{\text{н}}$ с тем, чтобы не ограничивать допустимое число включений по нагреву; величина возбуждающей симметричной емкости

для КМТ принята равной 6 C_n , а для КДТ, реализуемого по схеме КДТ-2, 8 C_n .

Повторяемость величин и, следовательно, точность способа торможения характеризуются цифрами максимального отклонения, которые относятся к времени торможения. Только для конденсаторного торможения из-за влияния механического тормоза разброс в пути оказывается больше, чем во времени.

Данные табл. 5 показывают, что для группы малоинерционных приводов при выбранных параметрах все способы комбинированного торможения оказываются эффективнее противотокового. Исключительно эффективным является КМТ. Для двигателей меньшей мощности эффективность КМТ несколько увеличивается, а КДТ и МДТ уменьшается; для двигателей большей мощности — наоборот.

Вторую группу составляют приводы главного движения металлорежущих станков мощностью 5—15 кВт (5 и 6 габариты в четырехполюсном исполнении) с суммарным моментом инерции, превышающим трехкратный момент инерции ротора двигателя. Для таких приводов справедливы данные табл. 6, которые позволяют представить изменение относительной эффективности торможения при увеличении мощности и инерционности электроприводов.

Таблица 6

Показатели эффективности способов торможения для приводов главного движения (относительно ПТ)

Способ торможения	Время торможения	Тормозной путь	Отклонение времени и пути от средней величины ($\pm$)	
			не менее	не более
ПТ	1,0	1,0	0,08	—
ДТ	4,5	6,0	—	0,03
МДТ	3,5	4,5	—	0,03
КМТ	2,0	1,6	—	0,02
КДТ	1,1	1,0	—	0,05
КТ	1,8	1,2	—	0,06

Относительные параметры тормозных устройств и схем такие же, как и для предыдущей группы.

Данные таблицы показывают, что комбинированные способы торможения с использованием конденсаторов остаются достаточно эффективными и при возрастании мощности приводных двигателей. Заметно снижается эффективность только тех способов, у которых существенную роль играет магнитное торможение. В некоторых случаях для инерционных приводов

может оказаться эффективным трехступенчатое конденсаторно-магнитно-динамическое торможение (КМДТ), которое позволяет получить эффективность такую же или несколько более высокую, как и КДТ или ПТ; но при большей плавности торможения.

Надежность тормозного устройства, представляемого в виде функциональной системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, определяется произведением вероятностей их безотказной работы. При этом вероятность безотказной работы или вероятность отказа рассчитывают за одинаковый календарный промежуток времени. Наибольшую трудность при таких расчетах представляет правильное определение интенсивности отказов элементов, влияющих на надежность устройства, при заданном режиме их работы. Эти данные весьма ориентировочны и разноречивы, поэтому правильно принимать их по одному источнику, а расчеты надежности рассматривать в сравнительном аспекте.

Проведенные расчеты для всех проанализированных выше способов торможения и схем тормозных устройств для двигателей мощностью 1,0—10 кВт при 60, 120, 400 и 1200 включениях в час позволяют оценить их надежность. Принимают, что при трехфазной работе и продолжительности включения, равной 0,5, привод отработывает в месяц 500 ч. Обобщенные показатели вероятности отказов за 500 ч работы для двух наиболее характерных чисел включений приведены в табл. 7.

Таблица 7

Сравнительная оценка надежности способов торможения

Способ торможения	Вероятность отказа за месяц работы при числе включений в час	
	60	400
ПТ	0,59	0,99
ДТ	0,45	0,95
МДТ	0,53	0,99
КМТ	0,43	0,95
КДТ	0,56	0,97
КМДТ	0,53	0,99
КТ	0,30	0,85

Наиболее надежным оказываются КТ и КМТ, наименее надежным ПТ, у которого, кроме того, весьма высокая (0,585) вероятность реверса, равная нулю для всех остальных способов.

Экономичность различных способов торможения наиболее правильно оценивать по годовым приведенным затратам, учитывающим как капитальные вложения, так и эксплуатационные расходы, включающие стоимость электроэнергии, заработную плату персонала, расходы на текущий ремонт и амортизационные отчисления. При расчете

амортизационных отчислений представляется возможным учесть надежность элементов, которая таким образом находит стоимостное выражение.

Типичные обобщенные результаты расчетов экономичности

представлены на рис. 47. Наиболее экономичными способами торможения для двигателей первой группы при любом числе включений оказываются КТ и КМТ, а для двигателей второй группы — КТ. Здесь, как и раньше, рассматривают КТ с добавочным механическим тормозом. Во второй группе показатели всех комбинированных способов торможения мало отличаются друг от друга. С ростом мощности двигателей экономичность торможения с применением конденсаторов уменьшается из-за роста их стоимости. Применение электролитических конденсаторов снижает капитальные затраты в сред-

Таблица 8

Показатели тормозных устройств (относительно ПТ)

Способ торможения	Объем тормозного устройства	Масса тормозного устройства	Потери энергии в двигателе
ПТ	1,0	1,0	1,0
ДТ	3,3	3,3	0,3
МДТ	3,5	3,5	0,3
КМТ	1,2	1,5	0,18
КДТ	3,8	4,3	0,25
КДТЭ	3,5	3,6	0,25
КТ	1,2	2,0	0,18

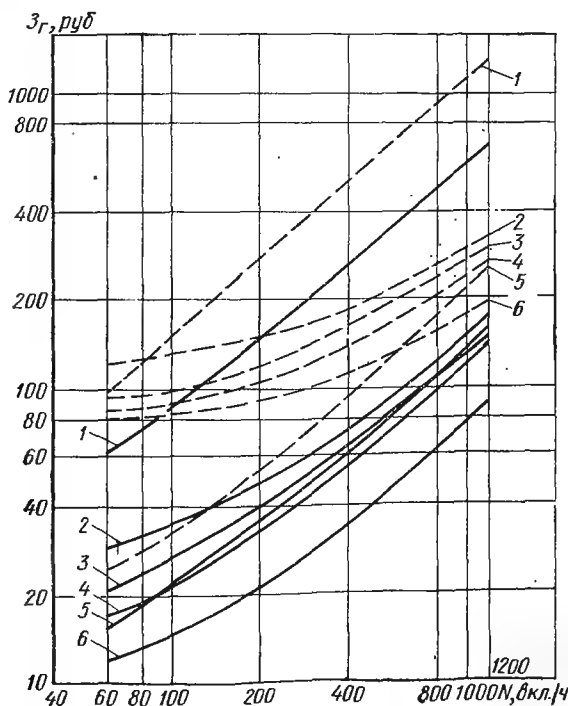


Рис. 47. Зависимость годовых приведенных затрат Z_g на тормозные устройства от числа включений в час при разных способах торможения для двигателей мощностью 2,2 кВт (сплошная линия) и 10 кВт (штриховая линия): 1 — ПТ; 2 — КДТ; 3 — КМДТ; 4 — КМТ; 5 — ДТ и МДТ; 6 — КТ

нем в 10 раз и делает все эти способы значительно экономичнее противотокового торможения при любом числе включений в час.

Показатели тормозных устройств характеризуются данными табл. 8, в которой также приведена относительная величина потерь энергии в двигателе при торможении. Как и прежде, за единицу взяты величины для противотокового торможения. Необходимо отметить, что применение электролитических конденсаторов уменьшает в среднем массу конденсаторной батареи в 25 раз, а объем в 30 раз по сравнению с бумажными.

Для конденсаторно-динамического торможения приведены данные и по схеме КДТ-5 с электролитическими полярными конденсаторами (КДТЭ). Техничко-экономические данные помогают выбирать наиболее рациональные для каждого конкретного случая способы торможения.

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Основными элементами, определяющими технико-экономические показатели всех тормозных устройств, являются контакторы, реле, резисторы и выпрямители, а для большинства комбинированных способов торможения, кроме того, и конденсаторы, которые в этом случае представляют собой наиболее дорогую часть всего устройства.

Выбор пускателей, реле, резисторов и выпрямителей затруднений не представляет; их выбирают по известным правилам с учетом свойств элементов и условий их работы в данном тормозном устройстве. Эти условия определяются как особенностями выбранного способа торможения, так и принципами построения схемы управления. Например, при выборе выпрямителей необходимо определять максимальную величину обратного напряжения, которое при конденсаторно-динамическом торможении существенно изменяется в зависимости от схемы его реализации. Максимальное обратное напряжение $U_{обр}$ на плече выпрямительного моста зависит от величины питающего выпрямительный мост напряжения U_2 и величины номинального линейного напряжения сети U_H : для схемы КДТ-1 $U_{обр}=0,7 U_2$ В, для схемы КДТ-2 $U_{обр}=0,7(U_2+0,8 U_H)$ В; для схемы КДТ-3 $U_{обр}=0,7(U_2+1,2 U_H)$ В; для схемы КДТ-4 и КДТ-5 $U_{обр}=0,7(U_2+U_H)$ В.

Труднее правильно выбрать конденсаторную батарею, которая в конечном счете определяет стоимость, а часто и габаритные размеры всего тормозного устройства. Выбор схемы включения конденсаторов определяется прежде всего требованиями к характеру тормозного процесса и производится по соображениям, изложенным выше. Конденсаторы, как указывалось, можно подключать к двигателю глухо без коммутирующих аппаратов (см. рис. 23, а) и только на время торможения после

отключения двигателя от питающей сети с помощью отдельного коммутирующего аппарата (см. рис. 23, б). Для получения плавно изменяющегося тормозного момента конденсаторы нужно включать симметрично в три фазы. Если допустима пульсация тормозного момента, то возможно однофазное включение конденсаторов, которое приводит к уменьшению общей емкости конденсаторной батареи. Чаще всего принимают трехфазное симметричное подключение.

Схема с глухим подключением конденсаторов обладает тем преимуществом, что торможение начинается сразу после отключения двигателя от сети и происходит даже при исчезновении сетевого напряжения. Однако при глухом подключении конденсаторов к сети 380 В согласно существующим правилам можно применять только специальные их типы, рассчитанные на длительную работу в цепи переменного тока. К ним относятся дорогие конденсаторы типа МБГЧ на напряжение 500 В или громоздкие типа КМ (КМВ) на 380 В. Длительные наблюдения показали, что возможно применение также более подходящих для станков конденсаторов типа КБГ-МН на 1000 В, а при повторно-кратковременном режиме с продолжительностью включения меньше 0,5 — типа КБГ-МН на 600 В.

Схема с подключением конденсаторов после отключения двигателя от сети позволяет применять более дешевые и малотабаритные металлобумажные конденсаторы типов МБГП и МБГО, предназначенные для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока. Возможность их применения, доказанная опытом длительной эксплуатации, основана на следующем.

В момент подключения конденсаторов величина напряжения, наводимого в обмотках статора остаточным затухающим магнитным полем двигателя, зависит от интервала времени между переключением коммутирующих аппаратов. В наихудшем случае при использовании быстродействующих пускателей, например типа ПМЕ, амплитуда линейного напряжения на зажимах статора может составить 450—500 В. При подключении конденсаторов асинхронная машина возбуждается и напряжение в первый полупериод может возрасти на 10—20%, после чего его амплитуда и частота быстро снижаются прямо пропорционально снижению скорости привода, которая, в свою очередь, уменьшается в процессе торможения по закону, близкому к экспоненте с постоянной времени, зависящей от величины инерционных масс.

Такой закон изменения амплитуды и частоты приложенного к конденсатору напряжения создает облегченные условия его работы, если потери энергии в конденсаторе, определяемые величиной тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$, не превысят за одно торможение величины, допустимой для данного конденсатора по условиям его теплового режима. Применение конденсаторов возможно, если энергия, выделяющаяся за одно торможение,

не превышает величину, допустимую для режима работы, определяемого техническими условиями на конденсаторы данного типа. Конденсаторы нужно выбирать по следующей методике.

Тепловые потери в конденсаторе в режиме конденсаторного торможения с подключением конденсаторов после отключения двигателя от сети

$$W_9 = \operatorname{tg} \delta C \int_0^{t_T} \left(U_m e^{-\frac{t}{B}} \right)^2 \left[(\omega_H - \omega_K) e^{-\frac{t}{B}} + \omega_K \right] dt \text{ Дж}, \quad (31)$$

где C — емкость конденсатора, Ф; t_T — время торможения, в течение которого включен конденсатор, с; U_m — амплитуда первого после возбуждения двигателя полупериода напряжения, В; ω_H , ω_K — угловые частоты напряжения в начале и конце торможения, 1/с; B — электромеханическая постоянная.

Решая уравнение (31), получим

$$W_9 = U_m^2 C \operatorname{tg} \delta \left[\frac{\omega_H - \omega_K}{3} \left(1 - e^{-\frac{3t_T}{B}} \right) + \frac{\omega_K}{2} \left(1 - e^{-\frac{2t_T}{B}} \right) \right] \text{ Дж}. \quad (32)$$

Угловую частоту ω_H в начале торможения можно принимать равной частоте сети, а частоту ω_K , соответствующую прекращению режима, определяют, как и время торможения t_T , в зависимости от конкретных условий работы схемы. Если торможение прекращается при некоторой частоте вращения ротора ω_{TK} , то

$$\omega_K = 2\pi f \frac{\omega_{TK}}{\omega_0} \text{ 1/с}, \quad (33)$$

где f — частота сети; ω_0 — синхронная скорость вращения двигателя.

Если конденсаторы подключены до конца конденсаторного торможения при ω_{TKH} , то ω_{TK} определяют по выражению (16).

Электромеханическая постоянная

$$B = J_\Sigma \frac{\omega_H - \omega_{TK}}{M_{T.M}} \text{ с}, \quad (34)$$

где J_Σ — суммарный момент инерции привода, приведенный к скорости ротора, кг·м²; $M_{T.M}$ — максимальная величина тормозного момента в начале торможения, Н·м.

Энергия, выделяющаяся в конденсаторе за время $t_{ц}$ некоторого цикла работы в режиме, соответствующем техническим условиям,

$$W_{T.ц} = \frac{K^2}{2} U_p^2 \omega_0 C \operatorname{tg} \delta t_{ц} \text{ Дж}, \quad (35)$$

где U_p — рабочее напряжение конденсатора, В; K — коэффициент, определяемый отношением амплитуды переменной со-

ставляющей, допускаемой техническими условиями для данного типа конденсатора, к его рабочему напряжению, приводится в каталогах; для конденсаторов типа МБГО $K=0,2$.

Исходя из условия, что при равенстве времени торможения и времени цикла энергии W_K должна быть с некоторым запасом меньше энергии $W_{тл}$, можно найти время торможения привода, обеспечивающего допустимый тепловой режим конденсатора:

$$t_{т(доп)} = \frac{U_m^2 B (2\omega_{гн}^D - \omega_{гк}^D)}{3K^2 U_p^2 K_з}, \quad (36)$$

где $K_з$ — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,2—1,4.

Во время торможений возможны местные перегревы и микропробой изоляции с последующим самовосстановлением, которые не оказывают влияния на тормозной режим, но ускоряют разрушение конденсаторов. Однако исследования показали, что при напряжении сети 380 В, 100 торможениях в час и двухсменной непрерывной работе конденсаторы типа МБГО имеют следующую долговечность [5]: МБГО 10 мкФ на 600 В — более 5 лет; МБГО 30 мкФ на 300 В — не менее 5 лет; МБГО 30 мкФ на 160 В — не менее 3 лет.

Опыт длительной эксплуатации установок подтверждает эти данные. Практически конденсаторы МБГО на 300 и 600 В не ограничивают срок службы тормозных устройств.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Применение металлобумажных конденсаторов существенно снижает габаритные размеры и стоимость тормозных устройств. Однако и в этом случае конденсаторная батарея остается наиболее дорогим элементом. Этот недостаток в значительной мере может быть устранен применением электролитических конденсаторов, которые на порядок дешевле и значительно меньше металлобумажных.

Существуют две группы электролитических конденсаторов: полярные и неполярные. Последние предназначены для работы в цепях переменного тока и могут быть успешно использованы в тормозных устройствах. Однако ограниченность выпуска этих конденсаторов делает более реальным применение самых дешевых и распространенных сухих полярных электролитических конденсаторов (ПЭК).

Полярные электролитические конденсаторы предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока. При использовании их в тормозных устройствах к ним систематически, хотя и кратковременно, прикладывается переменное напряжение большой величины, что вызывает существенное изменение их свойств. Последнее, в свою очередь, отражается на

характере и эффективности тормозного режима, поэтому применение ПЭК в тормозных устройствах возможно только на основании правильной оценки и учета взаимного влияния свойств конденсаторов и характеристик тормозного режима. Для этого необходимо вкратце остановиться на основных свойствах ПЭК.

В полярных электролитических конденсаторах диэлектриком является тонкая оксидная пленка, нанесенная на алюминевую (танталовую) пластинку, служащую первой обкладкой конденсатора. Второй обкладкой служит электролит, соприкасающийся с оксидной пленкой. Наличие электролита в жидком, полужидком или чаще всего в пастообразном состоянии является необходимым условием для получения высокой электрической прочности оксидного слоя, но вместе с тем вызывает увеличение тангенса угла потерь по сравнению с бумажными конденсаторами из-за большего сопротивления второй обкладки. Возможность изменять толщину оксидного слоя от нескольких сотых долей до единиц микрометра определяет главное преимущество ПЭК — их малые габаритные размеры. При нанесении оксидного слоя на первую обкладку в электролитической ванне металл находится под положительным потенциалом, поэтому для получения высоких электрических характеристик металлическая пластина, на которую нанесен оксидный слой, при работе конденсатора также должна находиться под положительным потенциалом. Если подать на нее отрицательный потенциал, то проводимость оксидного слоя резко возрастает и через конденсатор пройдет большой ток. Таким образом, оксидная пленка имеет униполярную проводимость, что делает ВЭК полярным конденсатором и определяет его использование только при постоянном или пульсирующем напряжении.

Действие переменного напряжения на ПЭК зависит как от величины амплитуды этого напряжения, так и от продолжительности его приложения. При длительном действии высокого переменного напряжения происходит интенсивный нагрев конденсатора, приводящий к полному его разрушению. При длительном действии переменного напряжения небольшой величины, когда температура нагрева конденсатора не превышает допустимую, происходит постепенное оксидирование катодной пластины, в результате чего последовательно с основной емкостью конденсатора как бы включается дополнительная, что в конечном итоге снижает суммарную емкость ПЭК. Амплитуда переменной составляющей при длительном приложении к ПЭК строго регламентирована и не должна превышать в зависимости от типа конденсатора 0,1—0,25 величины номинального рабочего напряжения. Кратковременное действие высокого напряжения, имеющее место при конденсаторном торможении, техническими условиями на ПЭК не регламентируется.

ПЭК, как и металлобумажные конденсаторы, можно применять в тормозных устройствах только при подключении их к статорной обмотке двигателя после его отключения от сети. При этом к конденсаторам будет кратковременно приложено переменное напряжение уменьшающейся амплитуды и частоты. Систематическое приложение такого напряжения вызывает изменение свойств ПЭК, анализ которого удобно провести с помощью схем замещения, приведенных на рис. 48 [6].

При приложении переменного напряжения с амплитудным значением U_m к зажимам ПЭК емкостью C_0 схема замещения имеет вид, показанный на рис. 48, а. Под действием напряжения катодная пластина постепенно окисляется и начинает приобретать свойства анодной, что эквивалентно последовательному включению еще одного ПЭК, но со встречной полярностью (рис. 48, б).

По мере формовки сопротивление $R_{зп}$ в непроводящем направлении становится во много раз больше сопротивления $R_{пр}$. Формующие напряжения при этом уравниваются и стремятся к величине U_m , имеющей при конденсаторном торможении максимальное значение, равное амплитуде линейного напряжения сети $U_{м.л}$.

Емкости C_1 и C_2 определяют по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\epsilon S_1}{a_1 U_1 N}; \\ C_2 &= \frac{\epsilon S_2}{a_2 U_2 N}, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость электролита; S_1, S_2 — площади анодной и катодной пластин, m^2 ; a_1, a_2 — коэффициенты, зависящие от толщины пластин; N — число включений.

После многократных торможений ($N \rightarrow \infty$) значения этих емкостей приблизятся к величинам

$$\left. \begin{aligned} C'_1 &= \frac{\epsilon S_1}{a_1 U_{м.л}}; \\ C'_2 &= \frac{\epsilon S_2}{a_2 U_{м.л}}. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Номинальное формовочное напряжение $U_{ф.н}$ составляет 1,1—1,2 номинального напряжения ПЭК, а начальная емкость

$$C_0 = \frac{\epsilon S_1}{(1,1 \div 1,2) U_{н} a_1}. \quad (39)$$

Практически при конденсаторном торможении $U_{м.л}$ всегда больше номинального напряжения применяемых конденсаторов. Тогда с учетом последнего выражения

$$C_1 = \frac{(1,1 \div 1,2) U_{н}}{U_{м.л}} C_0. \quad (40)$$

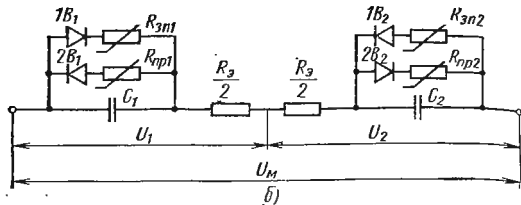
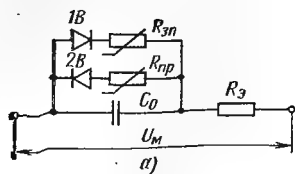


Рис. 48. Схемы замещения полярного электролитического конденсатора до (а) и после (б) деполяризации:

1В, 2В — идеальные вентили; R_{np} , R_{3n} — сопротивления оксидного слоя в проводящем и непроводящем направлениях; R_3 — сопротивление электролита

При одинаковых (или близких) геометрических размерах анодной и катодной пластин общая емкость ПЭК после формовки катодной пластины уменьшится

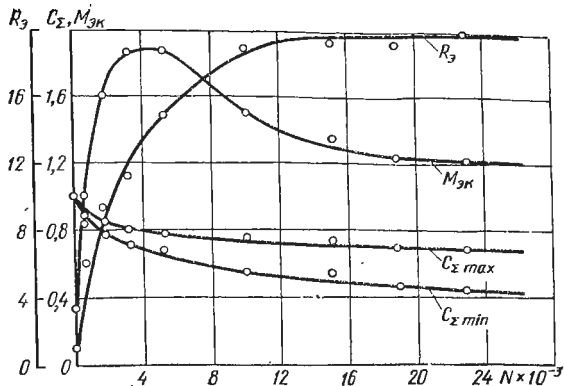
$$C = \frac{C_1}{2}. \quad (41)$$

Таким образом, при конденсаторном торможении ПЭК деполяризуется и снижает свою емкость прямо пропорционально прикладываемому максимальному напряжению и обратно пропорционально своему номинальному. Используя конденсаторы с большим U_n и снижая прикладываемое напряжение (например, соединением ПЭК в звезду), можно получить частичную стабилизацию емкости ПЭК.

Полярность ПЭК учитывается в схеме замещения шунтированием емкости конденсатора вентилем 2В и определяет их несимметрию, которая существенно влияет на характер и величину тормозного момента. Если ПЭК не подвергался воздействию переменного тока, то в начале торможения, когда к конденсатору прикладывается значительное переменное напряжение $R_{3n} \gg x_c \gg R_{np}$, конденсатор C_0 в один полупериод закорачивается вентилем 2В. В результате этого при трехфазном включении ПЭК в обмотках машины будут протекать токи основной и двойной частоты, создающие вращающиеся в разные стороны с различной скоростью магнитные потоки. Поэтому тормозной момент будет наряду с постоянной составляющей содержать и переменную утроенной частоты. Деполяризация ПЭК превращает его в симметричный элемент и устраняет переменную составляющую момента.

Если емкости C_1' и C_2' в соответствии с уравнениями (38) значительно меньше C_0 , то это должно привести к уменьшению тормозного момента при конденсаторном торможении. При $C_1' \approx C_2' \approx C_0$ изменение свойств ПЭК должно привести к возрастанию тормозного момента, ибо ПЭК при этом приближается к обычному бумажному конденсатору емкости C_0 . Из сказанного следует, что положительное влияние деполяризации

Рис. 49. Изменение параметров ПЭК и эффективности торможения в зависимости от числа включений N (величины эквивалентного тормозного момента $M_{ЭК}$ и сопротивления электролита $R_э$ даны в долях номинальных; $C_Σ$ — в долях первоначальной)



на тормозной эффект в значительной степени определяется номинальным напряжением ПЭК и величиной переменного напряжения, приводящего к деполяризации.

В соответствии с этим ПЭК можно разделить на две группы: низковольтные ($U_H \leq 160$ В) и высоковольтные ($U_H \geq 300$ В). Для первых деполяризация сопровождается снижением тормозного эффекта, что делает их применение для торможения нецелесообразным. Для вторых характерными являются параметры ПЭК, полученные экспериментально в результате испытаний конденсаторов КЭ-2М, 450 В (рис. 49).

Снижение емкости происходит значительно медленнее, чем в опытах с низковольтными ПЭК. К концу эксперимента емкость составляет в среднем 0,5 начальной, что соответствует приводимой выше величине [см. выражения (37) — (41)]. Одновременно значительно увеличивается сопротивление электролита во всех ПЭК, что приводит к повышению потерь в конденсаторах и уменьшению их электрической прочности. Первое должно быть учтено тепловым расчетом, а второе, как показал опыт длительной промышленной эксплуатации, не оказывает заметного влияния на долговечность конденсаторов, но должно учитываться при расчетах надежности. Наиболее важным следует считать рост эквивалентного тормозного момента и соответственно увеличение со временем эффективности торможения.

Экстремальный характер изменения эквивалентного тормозного момента объясняется тем, что небольшое увеличение сопротивления электролита увеличивает тормозной момент, выполняя роль нагрузочного сопротивления. При значительном увеличении этого сопротивления преобладающее влияние на изменение момента начинает оказывать не деполяризация, а уменьшение величины тока.

Типичные осциллограммы конденсаторного торможения асинхронного двигателя с подключением ПЭК, проработавших

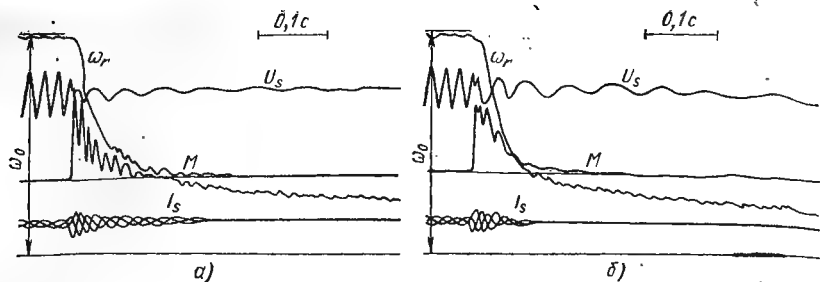


Рис. 50. Осциллограммы конденсаторного торможения двигателя АОЛ-21-4 в начале (а) и конце (б) деполяризации ПЭК типа КЭ-2-М 450 В, 3×40 мкФ

различное время в тормозном режиме, приведены на рис. 50. При подключении ПЭК с малой степенью деполяризации (рис. 50, а) в тормозном моменте явно выражена переменная составляющая утроенной частоты. По мере деполяризации переменная составляющая заметно уменьшается, а постоянная увеличивается (рис. 50, б). Важно отметить, что из-за высокой частоты переменной составляющей пульсации момента не отражаются на скорости ротора, которая монотонно убывает. Деполяризация ПЭК делает их практически тождественными обычным бумажным конденсаторам.

ПЭК можно успешно применять в устройствах конденсаторного торможения при подключении их к статору асинхронного двигателя только на время торможения. При этом должна быть исключена возможность приложения к ПЭК напряжения питающей сети переменного тока. Допустимо и рационально использование ПЭК для торможения станочных приводов, для которых некоторое изменение тормозного эффекта со временем не ухудшает качественных и количественных показателей работы механизма. Целесообразность применения ПЭК возрастает при необходимости минимизации объема и стоимости тормозного устройства.

ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ПЭК ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

По изложенным выше соображениям в тормозных устройствах следует применять ПЭК на рабочее напряжение не ниже 300 В. Практически для торможения двигателей, подключаемых к сети 380 В, лучше всего применять ПЭК на 450 В. Из-за особенностей технологии изготовления фактические параметры ПЭК имеют значительные отклонения от нормируемых номинальных. Допустимые отклонения в величинах емкости устанавливаются в пределах от -10 до +250%. Для тангенса угла потерь регламентируют лишь верхний предел. Существенный разброс наблюдается в величинах сопротивления электролита и испытательного напряжения. Поэтому при комплектowaniu

конденсаторной батареи необходимо измерять фактические параметры конденсаторов и комплектовать группы из параллельно включенных конденсаторов с параметрами, отличающимися не более чем на $\pm 10\%$.

Отобранные таким образом конденсаторы должны быть проверены на допустимость работы по условиям нагрева при заданном времени торможения или числа торможений в единицу времени. При этом выделяющаяся в конденсаторах энергия потерь не должна нагревать их выше допустимого предела. Точный расчет температуры ПЭК практически невозможен. Затруднительно и точное определение потерь в конденсаторах. Для практических инженерных расчетов рекомендуется приближенный метод, апробированный длительным применением.

Максимальная температура конденсатора (в $^{\circ}\text{C}$) в зависимости от температуры окружающей среды τ_0 , величины мощности P_{Σ} греющих потерь при длительной работе конденсатора и его размеров может быть определена по следующим выражениям [18]:

для цилиндрических ПЭК

$$\tau_{\max} = \tau_0 + \left[\frac{P_{\Sigma}}{\pi \beta \gamma (d)^{0,75} h} \right]^{0,8}; \quad (42)$$

для ПЭК, имеющих иную форму,

$$\tau_{\max} = \tau_0 + \frac{P_{\Sigma}}{\alpha S}, \quad (43)$$

где β — множитель, величина которого для вертикальных цилиндров зависит от высоты цилиндра, а для горизонтальных цилиндров равна 1; γ — коэффициент, зависящий от расположения цилиндров, $\gamma = 331 \cdot 10^{-6}$ для вертикальных цилиндров, $\gamma = 346 \cdot 10^{-6}$ для горизонтальных цилиндров; d — диаметр цилиндра, см; h — высота цилиндра, см; α — коэффициент теплоотдачи, $\alpha = 1 \cdot 10^{-3}$ (Вт/(см 2 ·К)); S — поверхность охлаждения корпуса, см 2 .

Задаваясь $\tau_{\max}$ и τ_0 по условиям эксплуатации ПЭК, из выражений (42) или (43) определяют величину P_{Σ} допустимой мощности греющих конденсатор потерь. Величина фактических потерь энергии, выделяющейся в конденсаторе, определяется характером данного тормозного режима и схемной реализации тормозного устройства. При простом конденсаторном торможении величину потерь энергии в конденсаторе определяют по выражению (32). Мощность потерь, выделяющихся в конденсаторе за одно торможение привода,

$$P_{\partial} = \frac{J_{\Sigma}}{6mt_r} (\omega_{гн}^2 - \omega_{гк}^2) \text{ Вт}, \quad (44)$$

где $\omega_{гн}$ и $\omega_{гк}$ — скорость вращения двигателя соответственно

в начале и конце торможения, c^{-1} ; m — число параллельно включенных ПЭК; t_T — время торможения, с.

Выражение (44) получено на основе допущений, облегчающих фактический температурный режим ПЭК. Эти допущения оправданы разбросом и нестабильностью характеристик конденсаторов, вследствие чего при параллельном включении нескольких ПЭК потери распределяются неравномерно и некоторые из конденсаторов оказываются в худших условиях.

При использовании выражения (44) допустимая по нагреву ПЭК длительность одного торможения

$$t_T = \frac{J_\Sigma (\omega_{гн}^2 - \omega_{гк}^2)}{6\pi\beta\gamma\alpha^{0.75}hm^{0.8}\sqrt{\tau_m - \tau_0}} \text{ с.} \quad (45)$$

В других тормозных режимах изменяются только выражения для определения потерь в конденсаторах. Так, при конденсаторно-динамическом торможении потери в конденсаторе определяются двумя составляющими: потерями, создаваемыми составляющей переменного напряжения, обусловленного самовозбуждением асинхронной машины в режиме конденсаторного торможения, и потерями от приложения к конденсаторам пульсирующего напряжения выпрямителя. Мощность второй составляющей потерь

$$P_n = [UI + \omega C \operatorname{tg} \delta U_{эф}^2] \frac{1}{t_T} \text{ Вт,} \quad (46)$$

где I — ток утечки, А; U — напряжение постоянной составляющей выпрямленного тока, В; ω — угловая частота переменной составляющей выпрямленного тока, c^{-1} ; $U_{эф}$ — эффективное значение переменной составляющей напряжения выпрямителя, В.

Если по расчету не обеспечивается нужное время тормозного цикла, то для облегчения теплового режима ПЭК можно последовательно с ними включать резисторы. Величина сопротивлений резисторов может изменяться в широких пределах, обычно применяют величины от 4 до 20 Ом. Введение резисторов должно быть учтено при определении параметров тормозного режима.

ТИРИСТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОРМОЗНЫМИ РЕЖИМАМИ

ОСОБЕННОСТИ ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ТИРИСТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ

Применение тиристоров для коммутации статорных цепей асинхронных двигателей позволяет создать простой и надежный, частично управляемый бесконтактный электропривод с хорошими динамическими свойствами. Тиристорным электроприводом управляют, воздействуя на величину, форму и степень несимметрии приложенного к двигателю напряжения за счет изменения угла проводимости коммутирующих тиристоров, поэтому такое управление получило название фазового.

При фазовом управлении асинхронный электропривод все время находится в последовательно сменяющих друг друга неустановившихся режимах, вызываемых переключением тиристоров. Сочетание таких квазистационарных режимов с электромагнитными переходными процессами оказывает существенное влияние на свойства электропривода. Исследование свойств асинхронного тиристорного электропривода с фазовым управлением сводится к анализу переходных процессов, возникающих вследствие чередования симметричных и несимметричных схем подключения машины в двигательном режиме или нескольких несимметричных в режимах торможения.

Тиристорное управление пуском и реверсом исследовано достаточно полно. Тиристорное управление тормозными режимами имеет некоторые мало изученные особенности, существенно влияющие как на физическую картину и свойства тормозных процессов, так и на способы их реализации. При тиристорном управлении асинхронным электроприводом резко возрастает значимость эффективного торможения. Последнее обусловлено тем, что применение тиристорного управления рационально при необходимости точной остановки привода или при большом числе его включений в единицу времени, когда время торможения составляет значительную часть рабочего периода.

Особенности тормозных процессов при тиристорном управлении определяются в основном дискретностью возбуждающей режим энергии и проводимости коммутируемых тиристорами электрических цепей. Особенности реализации тормозных режимов связаны как с возможностями быстродействующей и точной коммутации цепей, так и с совмещением, случайным или

управляемым, нескольких тормозных процессов, в том числе и обусловленных электромагнитными переходными явлениями.

Для эффективного торможения асинхронного электропривода с тиристорным фазовым управлением можно применять все рассмотренные выше способы электрического торможения. Наиболее просто реализуется динамическое торможение путем перевода в выпрямительный режим тиристоры, коммутирующих статорные цепи двигателя. Управление интенсивностью торможения может осуществляться воздействием на величину постоянной составляющей выпрямленного тока как изменениями угла открывания выпрямляющих тиристоры, так и вариацией схем их подключения к обмоткам двигателя. Существенное повышение общего тормозного эффекта и точности управления процессом торможения может быть достигнуто совмещением различных способов торможения. Например, для уменьшения магнитного потока двигателя и соответственно тормозного момента в зоне высоких скоростей возможно применение конденсаторного или магнитного торможения.

Большое число возможных схемных решений по каждому из сочетаний различных способов торможения делает необходимым предварительную оценку наиболее рациональных из них для последующего использования. Такая оценка может быть проведена только путем сравнения схем по определенным критериям.

Обычно принято оценивать эффективность способов торможения и схем их реализации по статическим тормозным характеристикам. Это наиболее простой, но и самый неточный метод сравнения, поскольку в большинстве случаев реальные динамические тормозные характеристики существенно отличаются от статических, а для некоторых способов торможения последние вообще не могут быть получены. Однако сопоставление статических тормозных характеристик имеет методологическое значение и может быть полезно для оценки эффективности торможения приводов с суммарным моментом инерции, во много раз превышающим момент инерции ротора двигателя, или в тех случаях, когда необходимо получение установившегося тормозного режима.

При тиристорном управлении фактические тормозные характеристики значительно отличаются от статических не только из-за влияния электромагнитных переходных процессов, но главным образом своеобразной формой тока, содержащего ряд гармонических составляющих, обуславливающих пульсирующий характер тормозного момента. Пульсации тормозного момента, вызванные дискретностью возбуждающего тока, сохраняются и в установившемся режиме торможения при постоянной скорости привода. Поэтому статические характеристики в данном случае можно строить двояким образом. Собственно статическая характеристика есть зависимость ско-

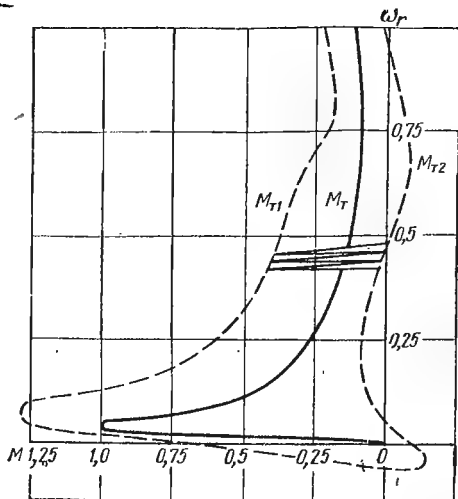
Рис. 51. Статическая и квазистатическая характеристики асинхронного двигателя в режиме динамического торможения с тиристорным фазовым управлением

рости от средней величины тормозного момента, постоянной при данной скорости. В отличие от нее квазистатическая характеристика представляет собой зависимость скорости от фактически пульсирующего тормозного момента. Наносить на график такие пульсации трудно, и поэтому квазистатические характеристики выражают связь между скоростью привода и геометрическим местом точек максимальных M_{T1} и минимальных M_{T2} значений тормозного момента при данной скорости. На рис. 51 приведены такие типичные статическая и квазистатическая характеристики, полученные путем записи средней и мгновенных величин тормозного момента при постоянных фиксированных частотах вращения ротора двигателя.

По осциллограммам торможения можно получить динамические характеристики путем исключения координаты времени. Эти характеристики отражают действительный характер изменения тормозного момента в процессе торможения с учетом различного рода его переходных составляющих. Из-за пульсирующего характера момента эти характеристики приходится строить аналогично квазистатическим, что определяет их внешнее сходство (рис. 52).

Сложность формы квазистатических и динамических характеристик затрудняет их использование для оценки и сравнения эффективности различных схем торможения. В тех случаях, когда нужна оценка эффективности с учетом действительного характера изменения скорости и тормозного пути, необходимо пользоваться критериями, связанными с интенсивностью поглощения кинетической энергии в процессе торможения.

Критериальное сравнение большого числа схем, реализующих различные способы торможения, позволило отобрать наиболее просто реализуемые и рациональные (рис. 53). К первой группе относятся схемы динамического торможения, которое при соединении обмоток двигателя звездой наиболее просто реализуется по схемам № 1 и 2. На этих схемах, как и на всех



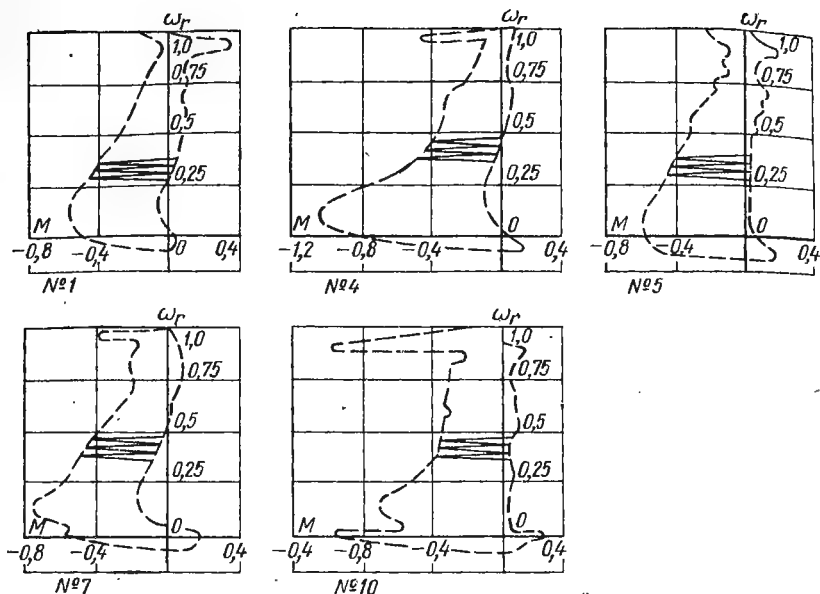


Рис. 52. Типичные динамические механические характеристики для разных способов торможения (номера под графиками соответствуют номерам схем на рис. 53)

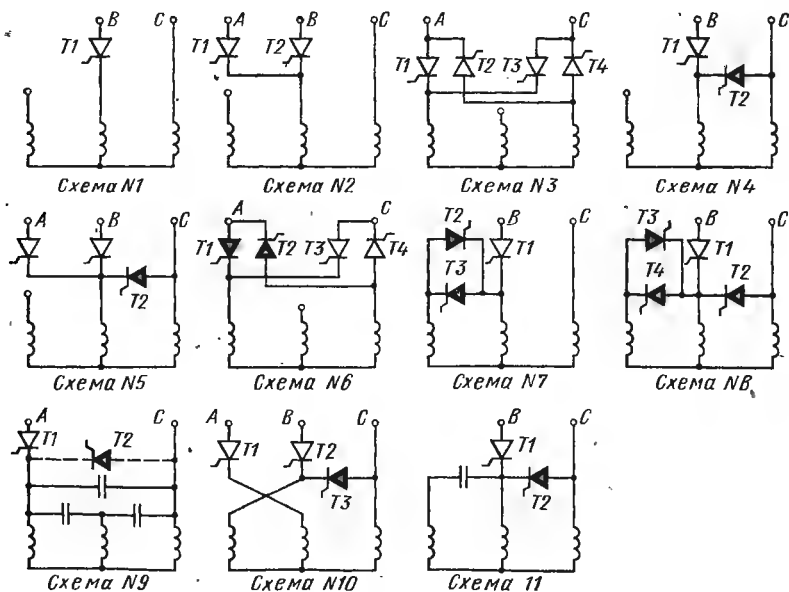


Рис. 53. Основные схемы реализации тормозных устройств при тиристорном управлении

последующих, показаны только тиристоры, участвующие в создании тормозного режима. Зачернены (условно) тиристоры, полностью открытые. В некоторых случаях они могут быть заменены неуправляемыми диодами. Тиристоры реализующие фазовое управление, показаны незачерненными.

Из-за значительной величины переменной составляющей выпрямленного тока схемы № 1 и 2 дают малую эффективность торможения, а в зоне высоких скоростей создают двигательный момент. Наилучший гармонический состав тока дают мостовые схемы выпрямления по типу схемы № 3. Сглаживание пульсаций тока и, следовательно, увеличение его постоянной составляющей может быть достигнуто и путем создания демпфирующих контуров, как показано на схемах № 4 и 5. В этих схемах шунтирующие тиристоры создают путь для прохождения тока под действием ЭДС самоиндукции и ЭДС вращения во время, не проводящего состояния выпрямляющих тиристоров. Для сглаживания пульсаций в мостовой схеме лучше применять полууправляемый мост, как показано в схеме № 6, в которой величиной тока управляют тиристоры T_3 и T_4 , тиристоры T_1 и T_2 полностью открыты и выполняют в процессе торможения роль неуправляемых вентилях, шунтирующих обмотки и создающих демпфирующие контуры. Эффективность демпфирующих контуров как средства увеличения постоянной составляющей возбуждающего тока иллюстрируется осциллограммами на рис. 54.

Магнитное торможение осуществляется с помощью встречно-параллельно включенных тиристоров, замыкающих накоротко обмотки двигателя по схемам № 7 и 8, в результате чего создается режим магнитно-динамического торможения. Реализация конденсаторно-динамического или конденсаторно-магнитного торможений возможна по схеме № 9, в которой конденсаторы можно включать симметрично или несимметрично.

Изменение направления вращения магнитного поля, созданного первой гармонической, достигается или перекрестным включением выпрямляющих тиристоров по схеме № 10, или однофазным включением конденсаторов по схеме 11 для создания необходимого сдвига фазы тока в одной из обмоток. Применение в таких схемах шунтирующих тиристоров уменьшает

Таблица 9

Сравнительная эффективность основных схем торможения

№ схемы на рис. 53	Критерий				
	$K_{ст}$	$K_{д-э}$	$K_э$	$K_{п-с}$	$K_{сх}$
1	0,17	0,71	5,82	0,51	1,9
2	0,43	0,83	4,33	0,58	0,8
3	0,47	1,02	1,42	0,68	0,5
4	0,77	1,23	1,31	0,87	0,8
5	0,83	1,22	1,20	0,89	0,67
6	0,90	1,25	0,91	0,93	0,5
7	0,26	1,00	3,62	0,50	0,8
8	0,83	1,25	1,23	0,85	0,67
9	—	1,56	0,41	—	0,8
10	0,67	1,09	0,91	0,81	0,57
11	0,80	1,54	0,58	0,87	0,8

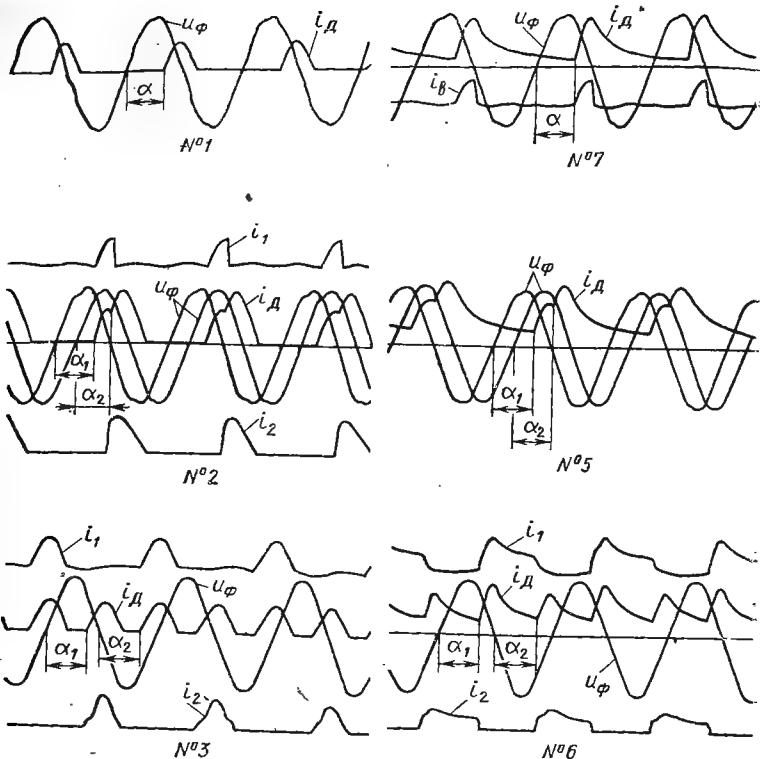


Рис. 54. Осциллограммы тока в обмотках статора асинхронного двигателя при торможении по различным схемам (номера соответствуют номерам схем на рис. 53)

пульсации тока и соответственно величину обратной составляющей магнитного поля, но увеличивает общий тормозной эффект.

В табл. 9 приведены данные, характеризующие сравнительную эффективность этих основных тормозных схем.

Качество статической характеристики оценивают по коэффициенту статической эффективности $K_{ст.э}$, который характеризует усредненную эффективность торможения по пути и времени, отнесенную к единице потерь. При оценке схем, имеющих сходную форму статической характеристики, $K_{ст.э}$ позволяет с высокой точностью оценивать эффективности торможения

$$K_{ст.э} = \frac{1}{\Delta P} \int_0^1 M d\omega, \quad (47)$$

здесь все величины выражены в относительных единицах.

Статистические характеристики нужно сравнивать при сопоставимых условиях, поэтому схемы динамического торможения должны сравниваться при одинаковой мощности потерь в статоре от выпрямленного тока. Величина эквивалентного по потерям фазного тока $I_{э.т}$ устанавливается для данной схемы с m фаз обмотки статора, участвующих в торможении:

$$I_{э.т} = I_H \sqrt{\frac{3K_{\Pi}}{m}}, \quad (48)$$

где K_{Π} — принятый для торможения коэффициент кратности потерь по отношению к номинальным.

При питании обмоток статора постоянным током $K_{ст.э}$ остается постоянным при изменении возбуждающего тока до величины, превышающей $3I_H$. Как показали исследования для большинства двигателей, только при токе больше $3,5I_H$ $K_{ст.э}$ начинает несколько уменьшаться из-за насыщения магнитной цепи в зоне низких скоростей. Поэтому в качестве базовой можно принять величину $K_{ст.э(n)}$ при питании обмоток постоянным током и для оценки схем применять коэффициент

$$K_{ст} = \frac{K_{ст.э}}{K_{ст.э(n)}}. \quad (49)$$

Для оценки интенсивности поглощения в процессе торможения кинетической энергии рекомендуется коэффициент динамической эффективности $K_{д.э}$, представляющий собой отношение времени торможения t_T к величине тормозного пути S_T , определяемого интегрированием кривой скорости $\omega_r(t)$. Если за условную единицу принять отношение времени t_T к величине тормозного пути, который прошел бы привод за это же время, но при неизменной величине тормозного момента, то в относительных единицах

$$K_{д.э} = \frac{\omega_{rH}}{2} \frac{t_T}{S_T}, \quad (50)$$

где ω_{rH} — скорость привода в начале торможения.

Чем больше $K_{д.э}$, тем эффективнее торможение.

Повышение эффективности торможения за счет увеличения возбуждающего тока связано с возрастанием потерь в двигателе и уменьшением допустимого числа торможений в единицу времени. Поэтому чем меньше потери при данной интенсивности торможения, тем эффективнее и экономичнее схема. Оценку энергетической экономичности схемы можно производить по величине относительных потерь в статоре, приходящейся на единицу тормозного пути S_T .

Критерий энергетической эффективности

$$K_{э} = \frac{m}{3} \frac{I_{э.т}^2}{T_H^2} \frac{\omega_0}{2} \frac{t_T}{S_T}. \quad (51)$$

Чем меньше K_a , тем меньше потери приходятся на единицу тормозного пути и тем меньше нагрев двигателя при равной эффективности торможения.

Своеобразная импульсная форма возбуждающего тока обуславливает увеличение греющих потерь за счет высших гармоник. Величина этих дополнительных потерь, как и форма тока, зависит от схемы торможения и угла открывания тиристоров. При постоянной величине угла энергетические качества схемы могут быть оценены коэффициентом пульсаций выпрямленного тока, который определяется отношением величины постоянной составляющей тока к действующему значению эквивалентного тока:

$$K_{п.с} = \frac{I_{ср}}{I_{эф}}. \quad (52)$$

Чем ближе коэффициент пульсаций к единице, тем меньше дополнительные потери и тем выше энергетические показатели схемы.

Если обозначить число тиристоров, необходимых для управления пуском, через $N_{п}$, а общее число их, участвующих в управлении пуском и торможением, через $N_{п.т}$, то экономичность данной схемы торможения может быть оценена схемным коэффициентом

$$K_{сх} = \frac{N_{п}}{N_{п.т}}. \quad (53)$$

При применении для управления асинхронным электроприводом реверсивных тиристорных коммутаторов оказывается возможным осуществлять схемы динамического торможения только за счет тиристоров коммутатора. Дополнительные тиристоры в этом случае не нужны, как и, следовательно, оценка схем коэффициентом $K_{сх}$. Из тиристоров реверсивного коммутатора могут быть образованы как схемы, приведенные на рис. 53, так и некоторые другие [25].

Данные табл. 9 показывают, что простые схемы однополупериодного динамического торможения малоэффективны. Наибольшее увеличение эффективности достигается применением демпфирующих контуров, и в этой группе по всем показателям наилучшей оказывается схема № 4. Для реверсивных приводов лучшей оказывается схема № 6, обладающая более высокими энергетическими показателями. Наиболее высокими показателями эффективности и экономичности обладают схемы КДТ. В этой группе наиболее эффективной и экономичной оказывается схема № 9 с шунтирующим вентилем.

Показатели последней группы схем, в которых используется обратно вращающееся поле первой гармоники, достаточно высокие. Однако их существенным недостатком является возникновение значительных по величине знакопеременных моментов,

создаваемых взаимодействием неподвижного и вращающегося полей. Эти моменты вызывают в кинематической цепи привода удары и вибрации, недопустимые в большинстве случаев по условиям эксплуатации. В схеме № 11 обратно вращающееся поле создается сдвигом фазы тока в одной из обмоток и знакопеременные моменты проявляются меньше.

Анализ показывает, что динамический критерий более полно характеризует эффективность схемы торможения, чем статический, и является предпочтительным. Вместе с тем статический критерий определяется единственной при данных параметрах привода и тормозного устройства статической тормозной характеристикой и поэтому является величиной постоянной. Динамический коэффициент является соответственно величиной переменной. Допущение его постоянства возможно только в том случае, если в результате управления электромагнитными процессами или соответствующего подбора параметров привода разброс динамических характеристик невелик.

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ

При тиристорном управлении динамическое торможение асинхронных двигателей имеет некоторые особенности. К ним в первую очередь относятся:

несинусоидальная форма тока, обуславливающая полигармонический характер его составляющих и соответственно появление не только тормозных, но и двигательных составляющих момента;

вызванное несинусоидальной формой тока возрастание коэффициента амплитуды, что приводит к насыщению магнитной цепи двигателя даже при небольших средних величинах возбуждающего тока;

существенное влияние остаточного потока ротора на характер процесса торможения;

зависимость тормозных характеристик и эффективности торможения от схем включения выпрямляющих тиристоров при равных действующих значениях возбуждающего тока.

При применении реверсивных тиристорных коммутаторов наилучшие показатели, как указывалось выше, имеет схема № 6 питания двух фаз обмотки статора от полууправляемого двухполупериодного мостового выпрямителя, дающая эффективность торможения, примерно равную эффективности при постоянном возбуждающем токе. В нереверсивных тиристорных коммутаторах, которые применяют значительно чаще, двухполупериодное выпрямление требует увеличения числа тиристоров и усложнения схемы управления. Разработаны схемы пуско-тормозных коммутаторов с однополупериодным выпрямлением и шунтированием обмотки статора дополнительным тиристором для увеличения постоянной составляющей выпрям-

ленного тока. Применение шунтирующих вентилях, кроме того, увеличивает тормозной эффект в зоне высоких скоростей за счет появления дополнительных тормозных моментов, обусловленных периодическими импульсами тока от ЭДС, наводимой полем вращающегося ротора в замкнутых обмотках статора. Частота и величина импульсов тока и момента изменяются пропорционально изменению угловой скорости двигателя.

Величина возбуждающего тока задается углом открывания выпрямляющих тиристоров, что и определяет его дискретную форму. Соответственно тормозной момент состоит из отдельных импульсов, следующих друг за другом с частотой сети, поскольку в выпрямленном токе наиболее сильно выражены нулевая и первая гармоники. Амплитуды импульсов момента изменяются в зависимости от скорости вращения двигателя соответственно изменению величины магнитного потока, создаваемого постоянной составляющей возбуждающего тока. При этом величина магнитного потока изменяется не только из-за размагничивающего действия токов ротора, как это имеет место при динамическом торможении с питанием обмотки статора постоянным током, но и из-за изменения величины выпрямленного возбуждающего тока, обусловленного зависимостью сопротивления роторной цепи двигателя от его скорости вращения.

В начале и конце торможения появляются переходные электромагнитные моменты, влияние которых на процесс торможения проявляется тем сильнее, чем меньше постоянная составляющая возбуждающего тока. При отсутствии в цепи статора дополнительных сопротивлений, что характерно для тиристорного управления, величина пиков переходных электромагнитных моментов в начале торможения может во много раз превысить величину номинального момента двигателя.

Совместное действие импульсных и переходных моментов определяет своеобразный характер тормозного процесса и су-

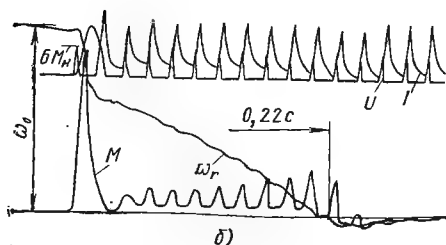
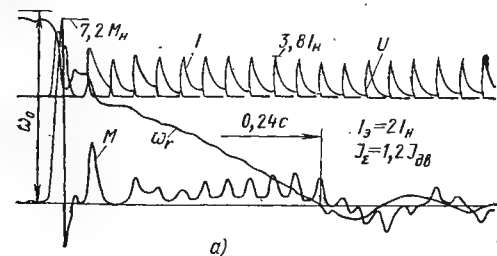
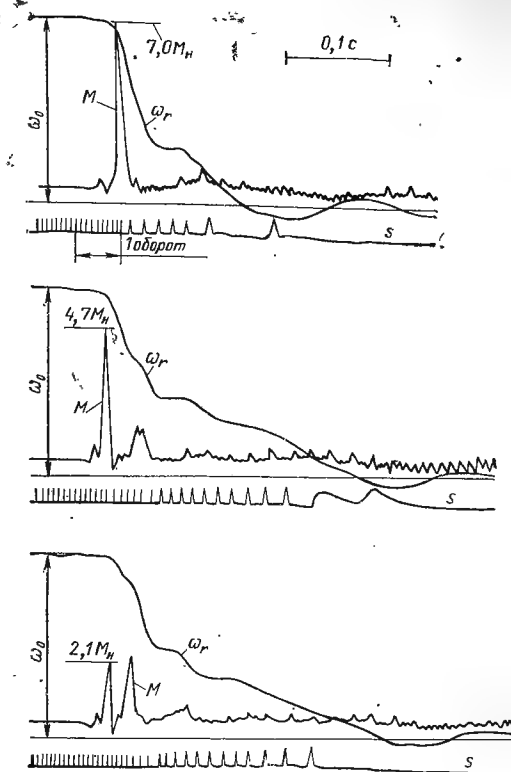


Рис. 55. Осциллограммы динамического торможения двигателя АО2-31-4 по схеме № 4 (а) и схеме № 8 (б)

Рис. 56. Осциллограммы динамического торможения двигателя АО2-31-4 по схеме № 8 при различных начальных условиях: s — путь в оборотах вала двигателя



ущественное влияние на него электромагнитных начальных условий. По проявлению этого влияния все схемы динамического торможения могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся схемы, у которых в одной из фаз обмотки статора ток во время торможения отсутствует, а две другие питаются одним или двумя линейными напряжениями и могут шунтироваться тиристорами для создания замкнутых демпфирующих контуров. Ко второй группе относятся схемы, у которых в процессе торможения обтекаются током все фазы обмотки статора.

Одной из самых типичных в первой группе является схема № 4 (см. рис. 53), обладающая наиболее высокими технико-экономическими показателями. Для схем второй группы типичной и наиболее рациональной является схема № 8. На рис. 55 приведены типичные осциллограммы тормозного режима электропривода с тиристорным управлением по этим схемам. Осциллограммы получены при торможении работающего без нагрузки двигателя АО2-31-4, параметры которого являются типичными для большой группы двигателей общего применения, используемых для приводов металлорежущих станков, требующих частых пусков и эффективного торможения.

Для иллюстрации влияния электромагнитных начальных условий на рис. 56 приведены осциллограммы изменения момента скорости вращения и пути при торможении того же двигателя по схеме № 8 с одинаковой величиной угла открывания выпрямляющего тиристора $T1$, но при различных начальных электромагнитных условиях. Осциллограммы показывают, что начальный этап существенно сказывается на протекании всего

процесса торможения и, в частности, на величинах времени и пути торможения. Поэтому управление процессом торможения при тиристорном управлении заключается не только в изменении средней величины возбуждающего тока, как это имеет место при контактном управлении, но и в учете влияния электромагнитных начальных условий, характеризуемых величиной и пространственной фазой вектора остаточного потока ротора, а также фазой вектора напряжения сети в момент начала торможения.

Существенное влияние фазы остаточного потока ротора на тормозной процесс при тиристорном управлении объясняется тем, что при открытом выпрямляющем тиристоре, например $T1$ (рис. 57, а), величина и форма тока в обмотках статора определяется совместным действием напряжения сети и двух переменных ЭДС, наводимых в этой обмотке. При закрытом выпрямляющем тиристоре ток в обмотках при замыкании их шунтирующим тиристором $T2$ определяется действием только этих двух ЭДС. Одна из них, ЭДС вращения, наводится в обмотке статора затухающим остаточным магнитным потоком, сцепленным после отключения двигателя от сети с обмоткой ротора. Вторая ЭДС самоиндукции возникает при подаче в обмотку статора импульсов выпрямленного тока.

Пространственная ориентация вектора остаточного магнитного потока определяется углом φ_ψ поворота этого вектора относительно оси α некоторой неподвижной координатной системы или совмещенной с ней обмотки фазы A двигателя (рис. 57, б). Величина фазового угла α_u напряжения сети отсчитывается (рис. 57, в) от точки прохождения через нуль положительной для выпрямляющего тиристора $T1$ синусоиды напряжения.

Существуют две характерные зоны начального положения вектора остаточного потока. Первая соответствует величине угла φ_ψ , изменяющегося от 90 до 270° . При этих углах ЭДС вращения по своему знаку соответствует проводящему направ-

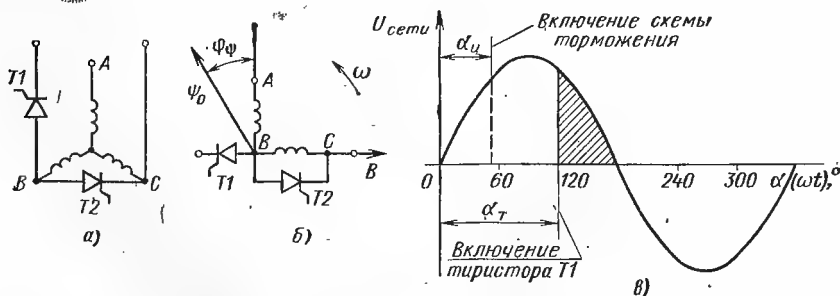


Рис. 57. Схемы включения обмоток (а) статора двигателя и эквивалентная (б), а также график (в) к отсчету фазы напряжения сети

лению шунтирующего тиристора T_2 и действует согласно с напряжением сети, поддерживая ток в обмотке. При изменении угла φ_ψ от 270° до 90° ЭДС вращения направлена встречно напряжению сети и препятствует протеканию как выпрямленного тока, так и тока в замкнутом контуре при закрытом выпрямляющем тиристоре T_1 .

Наибольший тормозной эффект соответствует углу $\varphi_\psi = 90^\circ$, при котором ось вектора потока совпадает с осью обмоток BC (рис. 57, б). В этом случае ЭДС вращения действует согласно с напряжением сети и в обмотках фаз $B-C$ протекает значительный по величине ток. При прохождении напряжения сети через нуль ток, проходящий через выпрямляющий тиристор T_1 , прекращается, а в обмотке он продолжает увеличиваться за счет ЭДС вращения, протекая по замкнутому контуру, созданному шунтирующим тиристором T_2 . Соответственно растет и момент, который по существу является результатом действия не динамического, а магнитного торможения.

Из-за значительной величины ЭДС вращения и ее согласного действия с ЭДС самоиндукции ток в обмотках в непроводящий выпрямляющим тиристором T_1 полупериод не успевает упасть до нуля и при повторном включении тиристора T_1 начинает возрастать, вызывая увеличение тормозного момента. После поворота вектора потока на 180° (что происходит медленно из-за низкой скорости ротора) ЭДС вращения меняет знак и действует встречно напряжению сети. Это приводит к уменьшению тока через тиристор T_1 и соответственно к уменьшению тормозного момента. Заключительный этап торможения происходит при затухшем остаточном поле. Форма и величина тормозного момента соответствуют импульсам возбуждающего тока, определяемого действием напряжения сети и ЭДС самоиндукции. Огибающая амплитуды моментов повторяет изменение момента при динамическом торможении постоянным током. Заканчивается процесс торможения колебаниями скорости, характерными для динамического торможения малоинерционных приводов. Этому случаю соответствует осциллограмма на рис. 58, а.

При начальной пространственной ориентации вектора остаточного потока, соответствующей углу $\varphi_\psi 270^\circ$, ЭДС вращения в обмотках BC имеет максимальную величину и направлена встречно напряжению сети. Эта ЭДС препятствует протеканию тока и может запереть тиристоры T_1 и T_2 . Тормозной момент отсутствует до тех пор, пока вектор потока ротора не повернется на угол, при котором ЭДС вращения значительно уменьшится или поменяет свой знак. Из-за высокой скорости ротора поворот на 90° происходит за часть полупериода. Изменение знака ЭДС вращения обуславливает появление тока в замкнутых тиристором T_2 обмотках BC независимо от состояния выпрямляющего тиристора T_1 . Последующее открыва-

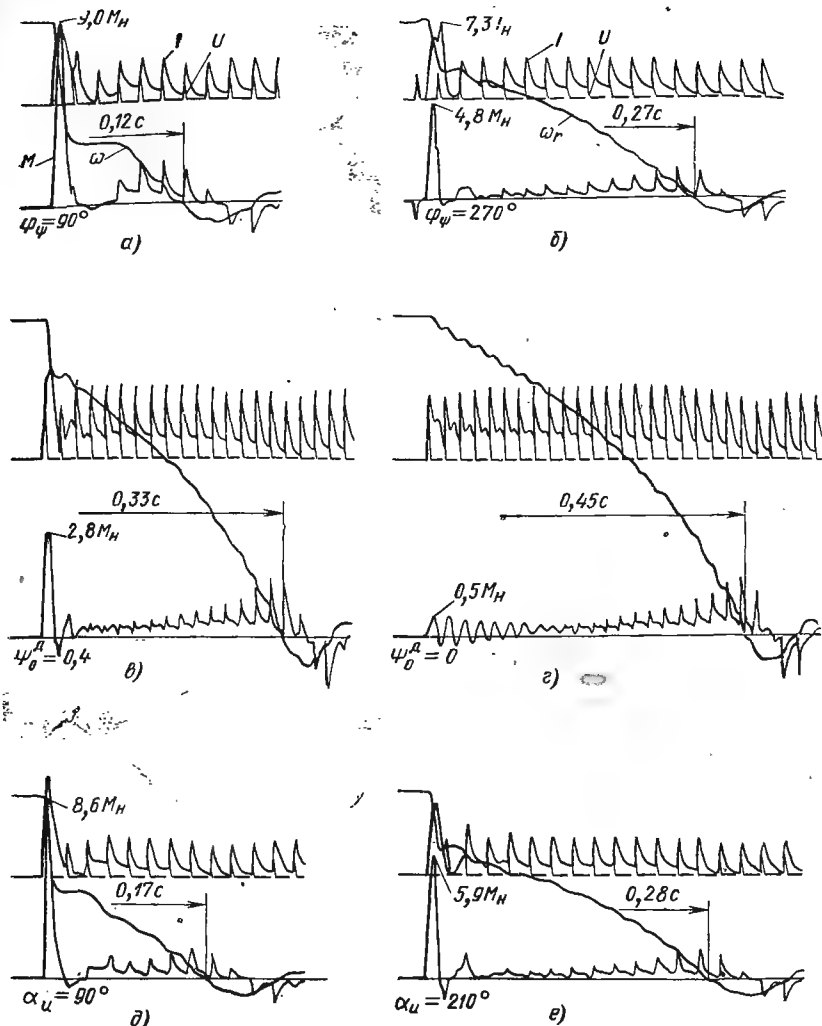
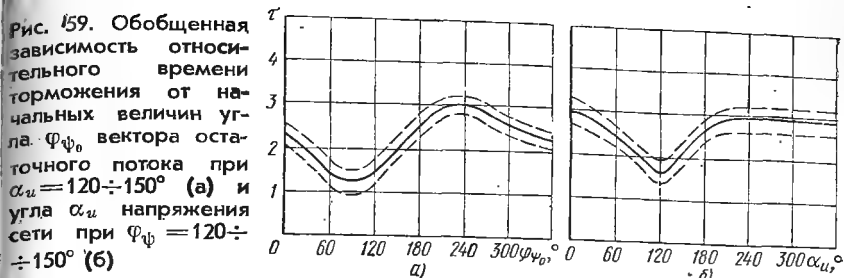


Рис. 58. Осциллограммы динамического торможения двигателя АО2-31-4 при различных начальных условиях:
 а, б — при $\Psi = \Psi_H$, $\alpha_u = 120^\circ$; в, г — при $\varphi_{\psi} = 90^\circ$, $\alpha_u = 120^\circ$; д, е — при $\Psi = \Psi_H$, $\varphi_{\psi} = 120^\circ$

ние $T1$ приводит к увеличению тока и возрастанию тормозного момента (рис. 58; б).

Дальнейшее вращение вектора потока приводит к новому изменению знака ЭДС и соответственно снижению до нуля тока и тормозного момента. За счет быстрого уменьшения тока возможно появление кратковременных переходных двигатель-



ных моментов, обуславливающих небольшое возрастание скорости двигателя. В дальнейшем процесс повторяется, но из-за быстрого затухания потока ЭДС вращения оказывает все меньшее влияние на величину тока и момента, которые определяются действием напряжения сети и ЭДС самоиндукции.

График усредненной зависимости времени торможения от начальной пространственной ориентации вектора остаточного потока приведен на рис. 59, а. Время выражено в долях от времени торможения данного привода под действием постоянного по величине тормозного момента, равного номинальному. На графике штриховой линией указана область разброса параметров для разных двигателей при изменении угла открывания выпрямляющих тиристоров от 120 до 150°. График дает наглядное представление о влиянии начального угла φ_{ψ} на эффективность торможения.

При постоянной пространственной ориентации вектора остаточного потока ротора φ_{ψ} его величина определяет величины ЭДС вращения и начального тормозного момента. Только при полном отсутствии остаточного потока (при нулевых начальных электромагнитных условиях) начальный переходный момент равен нулю (см. рис. 58, г).

Изменение начальной фазы напряжения, определяемой углом α_u , влияет на начальный момент и интенсивность торможения значительно меньше, чем изменение начального положения вектора остаточного потока. Наибольшая интенсивность торможения имеет место при $\alpha_u = 90 \div 180^\circ$, достигая максимума при $\alpha_u = \alpha_{\tau}$. При этих величинах углов в начальный момент торможения напряжение сети действует согласно с ЭДС вращения и ток, проходящий через выпрямляющий тиристор $T1$, имеет максимальную величину (см. рис. 58, д). Характер тормозного процесса от изменения угла α_u практически не зависит. Изменяется только величина пика переходного двигательного момента, возникающего во второй полупериод из-за поворота вектора остаточного потока.

При $\alpha_u \geq 180^\circ$ начальный этап торможения определяется только действием ЭДС вращения и протеканием тока в замкнутых обмотках через тиристор $T2$. К моменту последующего

включения выпрямляющего тиристора $T1$ вектор потока поворачивается на угол больший 270° и ЭДС вращения действует встречно напряжению сети, препятствуя увеличению тока в обмотке статора. Создается небольшой двигательный переходный момент (см. рис. 58, *e*). При повторном переходе вектора потока в зону углов $\varphi_\psi > 90^\circ$ снова возникает пик тормозного момента, но значительно меньшей величины из-за уменьшения остаточного потока. Этот пик на дальнейший процесс торможения практически не влияет.

Первоначальное снижение скорости привода незначительно, и поэтому возникающие импульсы тормозного момента малы и увеличиваются постепенно по мере снижения скорости.

График, приведенный на рис. 59, *б*, показывает экстремальный характер усредненной зависимости времени торможения от начальной фазы приложенного напряжения с максимумом эффективности при $\alpha_u = \alpha_T$. Сравнение его с графиком на рис. 59, *a* показывает большее влияние начальной пространственной ориентации вектора остаточного потока на эффективность торможения и пики начального переходного момента. Следовательно, главным средством управления эффективностью начального этапа торможения, как и всем процессом в целом, является воздействие на величину и пространственную ориентацию вектора остаточного магнитного потока.

Зависимости пиков начальных тормозных моментов от величины начальных электромагнитных условий (рис. 60, *a*) показывают большее влияние угла φ_ψ , чем угла α_u . Каждому начальному углу φ_ψ соответствуют определенные величины угла α_u , при которых время торможения может быть макси-

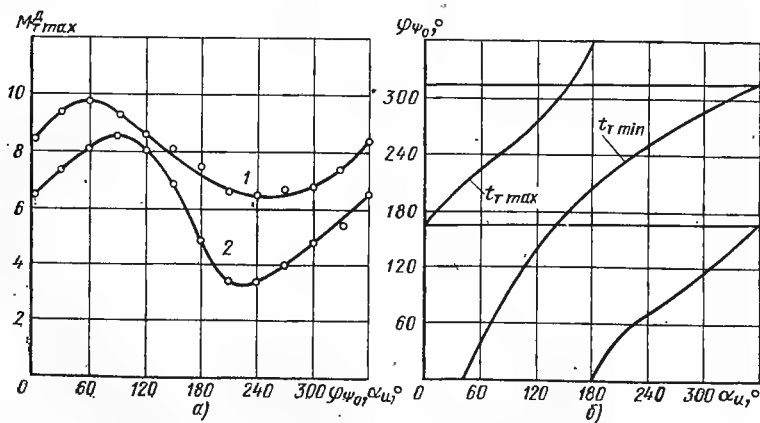


Рис. 60. Зависимость величины максимального тормозного момента $M_{T \max}$ от начальных условий (а) и кривые для определения их сочетания (б), обеспечивающего экстремальные величины времени торможения:

1 — $M_{T \max}^D = f(\alpha_u)$ при $\varphi_{\psi_0} = 90^\circ$; 2 — $M_{T \max}^D = f(\varphi_{\psi_0})$ при $\alpha_u = 120^\circ$

мальным или минимальным. На рис. 60, б приведены кривые, показывающие сочетание начальных условий, определяющие экстремальную величину времени торможения. Разрывность функций при $\alpha_u = 360^\circ$ определяется рассмотренным выше своеобразным характером влияния электромагнитных начальных условий. Графики позволяют подбирать параметры для реализации соответствующего управления тормозным процессом. Если необходимо получить минимальное время торможения при заданном угле α , определяемом средней величиной выпрямленного тока, например при $\alpha = 120^\circ$, то включение тормозных тиристоров следует производить при $\varphi_\psi \approx 150^\circ$. Изменение этого угла будет увеличивать время торможения.

Электромагнитные начальные условия, изменяя эффективность торможения, оказывают влияние и на величину потерь энергии в двигателе. Зависимость суммарных греющих двигателя потерь от электромагнитных начальных условий практически совпадает с аналогичной зависимостью относительного времени торможения. При оптимальных начальных условиях, когда в начале торможения развивается максимальный тормозной момент и происходит интенсивное замедление привода, величина тока и соответственно потери в двигателе увеличиваются. Однако длительность торможения и суммарная величина потерь оказываются меньше, чем при неблагоприятных или нулевых начальных условиях. Для повышения допустимого по условиям нагрева числа торможений необходимо использовать оптимальные начальные электромагнитные условия. Для малоинерционных приводов в этом случае можно в 1,5—2 раза уменьшить суммарную величину потерь. С увеличением суммарного момента инерции вращающихся масс привода влияние начальных электромагнитных условий уменьшается, поскольку процесс торможения происходит в основном при затухшем остаточном магнитном потоке.

Усредненные зависимости коэффициента K_T (рис. 61, а), равного отношению максимального времени торможения $t_{T \max}$ к минимальному $t_{T \min}$, определяется изменением начальных электромагнитных условий от добавочного момента инерции $J_{\text{доб}}$ привода, выраженного в долях момента инерции $J_{\text{дв}}$ ротора двигателя. Графики показывают, что влияние электромагнитных начальных условий быстро снижается с увеличением инерционности привода, но остается еще заметным даже при моментах инерции, в 2—2,5 раза превышающих момент инерции ротора двигателя. С увеличением возбуждающего выпрямленного тока влияние начальных условий возрастает.

Увеличение инерционности привода уменьшает и степень влияния начальных условий на величину греющих потерь в обмотках двигателя по причинам, рассмотренным выше. На рис. 61, б приведены графики изменения относительной величины потерь в зависимости от начального положения вектора

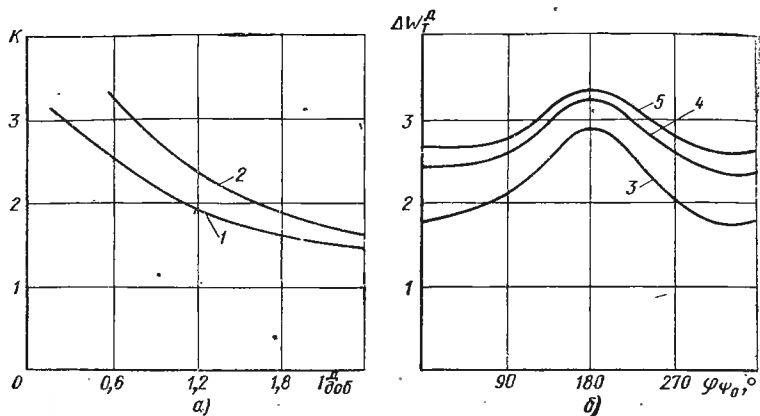


Рис. 61. Влияние начальных условий на эффективность (а) и энергетику (б) торможения в зависимости от инерционности привода:

1 — $I_T = 2I_H$; 2 — $I_T = 3I_H$; 3 — $J_{доб}^D = 0,2$; 4 — $J_{доб}^D = 1,1$; 5 — $J_{доб}^D = 1,9$

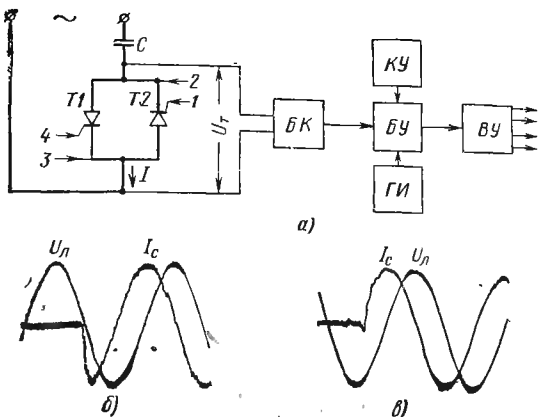
остаточного потока для приводов с различными моментами инерции, подтверждающие это положение. Начальная фаза напряжения сети постоянна и равна оптимальной.

Анализ данных исследования показывает, что оптимизация начальных условий целесообразна для приводов с $J_{\Sigma} < 2J_{дв}$, когда эффективность торможения может быть повышена в 2 раза и более, а потери в двигателе соответственно уменьшены. Необходимо отметить, что к таким приводам относится большинство механизмов металлорежущих станков.

УПРАВЛЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ ТОРМОЖЕНИЯ

Одним из наиболее эффективных способов управления тормозным процессом и, в частности, его интенсивностью является конденсаторное торможение. При тиристорном управлении реализация конденсаторного торможения требует учета особенностей процесса включения конденсатора на переменное напряжение. Опасность для коммутирующих тиристорov представляет не только величина переходного тока включения, которая из-за малого активного сопротивления цепи может на несколько порядков превысить амплитудное значение установившегося тока, но и скорость нарастания тока, а также повышение напряжения. Для устранения опасности повреждения тиристорov без увеличения их номинальных параметров или ограничения величины коммутируемой емкости необходимо включать конденсаторы в момент, когда равны нулю начальная фаза установившегося тока, или, что то же, мгновенное значение напряжения на тиристорах. При соблюдении этого условия сразу после включения конденсаторов начинается уста-

Рис. 62: Блок-схема устройства (а) и осциллограммы (б, в) включения конденсаторов при тиристорном управлении



новившийся режим без возникновения переходных составляющих тока и напряжения.

Блоки контроля напряжения БК (рис. 62, а) снимают запирающий сигнал с блока управления ВУ в момент, когда контролируемое напряжение на тиристорах равно нулю. Блок управления открывается на короткое время, необходимое для передачи сигнала от высокочастотного генератора импульсов ГИ выходному устройству ВУ, включающему тиристоры. Блок управления при наличии команды на включение конденсаторов от командного устройства КУ и разрешения контроля подает сигнал от генератора импульсов на выходное устройство, которое включает тиристоры. Осциллограмма на рис. 62, б иллюстрирует процесс включения незаряженного конденсатора, когда ток через него начинает протекать в момент прохождения через нуль синусоиды напряжения сети. Осциллограмма на рис. 62, в описывает процесс включения заряженного конденсатора, когда ток начинает проходить при равенстве нулю разности мгновенных значений напряжения сети и напряжения на конденсаторе. Осциллограммы сняты при управлении тиристорами с помощью устройства, разработанного на основе приведенной блок-схемы [19]. Применение такого устройства управления тиристорами позволяет использовать торможение с подключением конденсаторов по любой из рассмотренных ранее схем, но с встречно-параллельно включенными коммутирующими тиристорами вместо контакторов.

Наиболее эффективным способом комбинированного торможения является конденсаторно-динамическое (КДТ). При применении этого способа для асинхронных электроприводов с тиристорным управлением подключать конденсаторы можно симметрично или несимметрично, глухо или после отключения от сети, по схемам, аналогичным контакторным. Характер про-

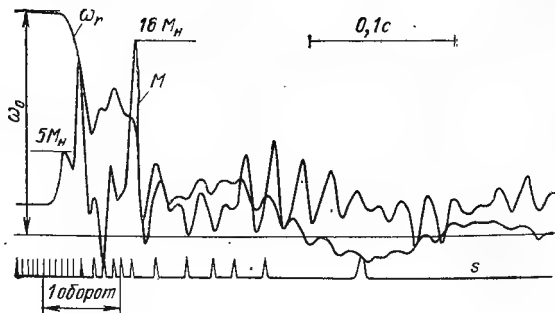
текания тормозного процесса зависит от принципа реализации КДТ. Если управление режимом КДТ выполняется по первому принципу, то процесс конденсаторного торможения никаких особенностей не имеет, а следующий за ним этап динамического торможения начинается при нулевых начальных условиях. При реализации КДТ по второму и третьему принципам тиристорное управление имеет некоторые особенности, связанные с малым активным сопротивлением цепи выпрямленного тока и дискретностью его формы.

Режим конденсаторного торможения при закрытых выпрямляющих тиристорах проходит так, как и при контактном управлении. В противоположность этому режим динамического торможения, даже если он начинается после полного окончания конденсаторного, отличается тем, что с началом не пропускающего полупериода ток продолжает проходить через выпрямляющий тиристор из-за разряда подключенных к обмоткам двигателя конденсаторов. Малое сопротивление цепи определяет колебательный характер разряда с частотой и амплитудой тока, зависящей от величины емкости конденсаторов и скорости двигателя. Увеличение переменной составляющей тока приводит к образованию соответственно двигательной составляющей момента, что определяет знакопеременный характер развиваемого двигателем момента на последнем участке торможения. Знакопеременный момент уменьшает эффективность торможения и обуславливает такой же знакопеременный характер изменения ускорения в процессе торможения малоинерционных приводов.

Если выпрямляющий тиристор оказывается при скорости вращения, близкой к $\omega_{\text{к.н.}}$, когда магнитный поток еще существует, то возникает переходный процесс, аналогичный процессу начала динамического торможения и ненулевыми электромагнитными начальными условиями. Из-за большой величины потока пик начального переходного момента может превышать номинальный в 12—15 раз. Управлять величиной этого момента можно по принципам, рассмотренным выше.

Открытие выпрямляющего тиристора до окончания процесса конденсаторного торможения приводит к возникновению пика переходного момента короткого замыкания и прекращению конденсаторного торможения аналогично тому, как это имеет место при реализации КДТ по второму и третьему принципам в схемах контактного управления с малым сопротивлением цепи выпрямленного тока. На осциллограмме (рис. 63) зафиксирован типичный тормозной процесс, соответствующий третьему принципу реализации КДТ — полному наложению режимов, когда конденсаторное торможение прекращается сразу при открывании выпрямляющего тиристора. После этого начинается режим динамического торможения, осложненный повторными короткими замыканиями с пиками тормозных и двигательных моментов.

Рис. 63. Осциллограмма конденсаторно-динамического торможения двигателя АО2-31-4 с тиристорным управлением по схеме № 9



Применение КДТ при тиристорном управлении без учета этих особенностей может привести к значительному ухудшению показателей режима торможения. Для повышения эффективности торможения следует реализовать КДТ по первому принципу с последовательным действием режимов. Для малоинерционных приводов возможно применение и второго принципа для получения большого переходного тормозного момента в начале второго этапа торможения. В обоих случаях для повышения эффективности и плавности динамического торможения на втором этапе следует отключать конденсаторы.

КДТ можно применять для формирования кривой момента с целью получения заданного темпа замедления привода или, напротив, весьма интенсивного снижения его скорости на первом этапе торможения. При высоких требованиях к управляемости режима тиристоры можно использовать только в качестве быстродействующих контакторов. Величина возбуждающего выпрямленного тока должна устанавливаться изменением активного сопротивления цепи без использования фазового управления тиристорами.

Динамические характеристики тормозных режимов при МДТ и КМТ с тиристорным управлением не отличаются от рассмотренной выше. Наибольший тормозной эффект в этих способах достигается при симметричном замыкании трех фаз статорной обмотки двигателя встречно-параллельно включенными тиристорами, которые выполняют только роль быстродействующих контакторов. Быстрота коммутации более необходима при МДТ для отключения обмоток двигателя от сети и их последующего замыкания без заметного снижения величины остаточного потока.

В заключение необходимо подчеркнуть, что при тиристорном фазовом управлении асинхронными электроприводами наиболее рационально применять динамическое торможение. Реализация преимуществ комбинированных способов торможения приводит, как правило, к значительному усложнению силовой части тормозного устройства и требует в отдельных слу-

чаях тщательного анализа особенностей режима. Целесообразность использования комбинированного торможения может быть доказана только технико-экономическим обоснованием с учетом результатов анализа динамических процессов.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ

Требования к схемам управления тиристорами пуско-тормозных устройств во многом определяются назначением данного пуско-тормозного коммутатора и структурой его силовой части.

Схема управления тормозной группой тиристоров согласуется со схемой управления тиристорами, управляющими пуском двигателя, и поэтому ее нельзя рассматривать отдельно.

В схему управления тиристорами входит входное устройство ВУ, которое синхронизирует открывающие импульсы с напряжением сети или током двигателя и задает начальный сдвиг этих импульсов в соответствии со схемой силовой части тиристорного коммутатора.

Входное устройство обычно выполняют на трансформаторах, позволяющих получить требуемую начальную фазировку и гальванически разделить питающую сеть от цепи управления.

Фазорегулирующее устройство ФУ осуществляет подачу отпирающих импульсов для поддержания установленного угла открывания тиристора или изменения его по заданному закону.

В качестве фазосдвигающих элементов обычно используют управляемые фазовращательные мосты, зарядно-разрядные RC-цепочки, магнитные элементы, полупроводниковые приборы (однопереходные транзисторы) и другие элементы.

Формирователи открывающих импульсов ФИ собирают на пороговых элементах с одним или двумя устойчивыми состояниями (симметричные триггеры, заторможенные блокинг-генераторы или мультивибраторы, триггеры с эмиттерной связью) и формируют импульсы с крутым рабочим фронтом и частотой следования, определяемой входным устройством. При динамическом торможении формирователи импульсов должны быть выполнены с несимметричным управлением.

Выходное устройство предназначено для согласования сформированного импульса с параметрами цепи управляющего электрода и для гальванического разделения цепей. Чаще всего выходное устройство представляет собой усилитель с трансформаторным выходом. Усилитель обычно собирают на мощном транзисторе, переводимом сформированным импульсом в ключевой режим.

По принципу управления все схемы можно разделить на две группы, основанные на независимом и зависимом способе управления. При независимом способе управления открывающий сигнал фазирован с напряжением сети, а угол открывания не зависит от изменения параметров нагрузки и от состояния тиристора. В зависимом способе управления подача команды на отпирание тиристора фазирован с током через тиристор, зависит от фазы тока и, следовательно, от изменения параметров нагрузки.

Наиболее распространены схемы, основанные на независимом способе управления. Одна из простейших схем осуществляет подачу на управляющий переход тиристора однополупериодного соответственно сфазированного тока. Такие схемы не получили распространения, так как в управляющем переходе выделяются значительные тепловые потери, а отпирающий фронт тока нарастает медленно, что также ухудшает работу тиристора.

Для формирования отпирающего импульса с крутым передним фронтом и ограниченной шириной (для уменьшения потерь) применяют более сложные схемы, позволяющие изменять фазу импульса, т. е. осуществлять изменение угла открывания тиристора. Для управления встречно-параллельным тиристорным элементом ТЭ, применяемым в большинстве коммутаторов, рационально использование симметричного триггера, способного создавать открывающие импульсы для двух тиристорov одновременно, легко изменять фазу этих импульсов симметрично для пусковых режимов двигателя и несимметрично для тормозных.

В схеме управления тиристором (рис. 64), выполненной по независимому принципу, в качестве синхронизирующего элемента применен трансформатор $Tr1$, вторичная обмотка которого через коммутирующие диоды $D1, D2$ осуществляет разряд фазорегулирующей емкости в непроводящий период тиристора. Изменение фазы сигнала отпирающего импульса осуществляется зарядной цепочкой $R3-C1$ в зависимости от величины управляющего напряжения U_{γ} .

Формирователь импульса, выполненный на транзисторе $ПТ1$, выдает сигнал на выходное устройство при заряде конденсатора $C1$ до величины напряжения управления. Входное устройство, выполненное на заторможенном блокинг-генераторе, при поступлении команды через конденсатор $C2$ включается и формирует на выходе трансформатора $Tr2$ отпирающий импульс, который поступает на управляющий переход тиристора. Поскольку в процессе пуска и торможения двигателя его $\cos \phi$ меняется в пределах 0,3—0,8, то для нормальной коммутации тиристора ширина отпирающего импульса должна быть 60—80°. Для получения импульса такой ширины в выходном устройстве применена обратная положительная связь, регули-

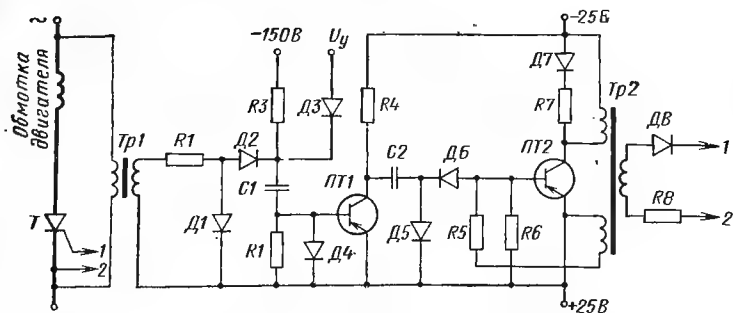


Рис. 64. Схема независимого управления тиристором с помощью RC-цепи

руемая резистором R_5 , сопротивление которого подбирают в зависимости от параметров выходного трансформатора.

Управление тиристорным коммутатором может быть также осуществлено от высокочастотного генератора при питании управляющих переходов тиристоров импульсами тока с частотой на 1—2 порядка выше частоты сети. Частоту, амплитуду и скважность импульсов выбирают из условий допустимого искажения кривой тока в нагрузке за счет паузы между импульсами и минимальных потерь в управляющем переходе при надежном отпирании всех тиристоров.

Для надежного переключения тиристора в проводящее состояние при активно-индуктивной нагрузке длительность импульса должна быть 150—300 мкс. Генерация импульсов повышенной частоты вместо формирования одного широкого импульса существенно упрощает схему, тепловой режим управляющего перехода тиристора улучшается, а требуемая мощность выходного устройства понижается. Кроме того, один генератор импульсов может управлять всеми тиристорами в режиме синхронного переключения.

В основу зависимых схем положен принцип управления тиристорными элементами, в котором амплитуда, длительность и фаза открывающего сигнала зависят от величины и фазы анодного напряжения на управляемых тиристорах. Анодное напряжение на открытых вентилях мало и увеличивается после их закрывания. Для двух встречно-параллельно соединенных вентилях в цепи переменного тока это происходит в тот момент, когда в цепи должен появиться ток другого знака. Иными словами, в зависимых схемах устанавливается непосредственная зависимость между фазой тока (сдвиг нулевых значений тока относительно нулевых значений фазных напряжений) и фазой открывающего импульса. Это означает, что происходит формирование командного импульса при появлении анодного напряжения на тиристорном элементе после естественного закрывания одного из встречно-параллельно включенных тири-

сторов, а длительность существования тока управления определяется временем переключения тиристора в проводящее состояние, так как при открывании тиристора его анодное напряжение практически исчезает.

Одним из схемных решений применения такого зависимого принципа управления для трехфазных тиристорных коммутаторов было использование диодных структур, в которых анодное напряжение всех тиристоров распределялось по управляющим электродам с помощью соответствующих цепей из диодов и резисторов. Диодные структуры очень просты, некоторые из них до сих пор остаются самыми простыми при решении вопроса коммутации тиристоров и многофазных цепях. Вместе с тем применение диодных структур для управления трехфазными тиристорными коммутаторами приводит к непосредственному соединению силовой цепи и цепи управления. Это затрудняет выполнение полностью бесконтактного управления, так как в командной цепи должен быть ключ, выдерживающий линейное напряжение сети. Кроме того, управляющие диоды необходимо выбирать по амплитуде линейного напряжения. Выход из строя одного из диодов структуры может привести к самопроизвольному запуску коммутатора или прожиганию тиристора.

В значительной мере эти недостатки устраняются при трансформаторном разделении цепей по схемам (рис. 65, а, б).

Развитием трансформаторных схем, использующих принцип зависимого управления, явилось применение информации об анодном напряжении не для непосредственного воздействия на управляющие электроды тиристоров, а для переключения пусковых схем (рис. 65, в). Информация о состоянии тиристоров осуществляется с помощью трансформатора $Tr1$, первичная обмотка которого подключена через конденсатор C параллельно тиристорам. Конденсатор улучшает формирование

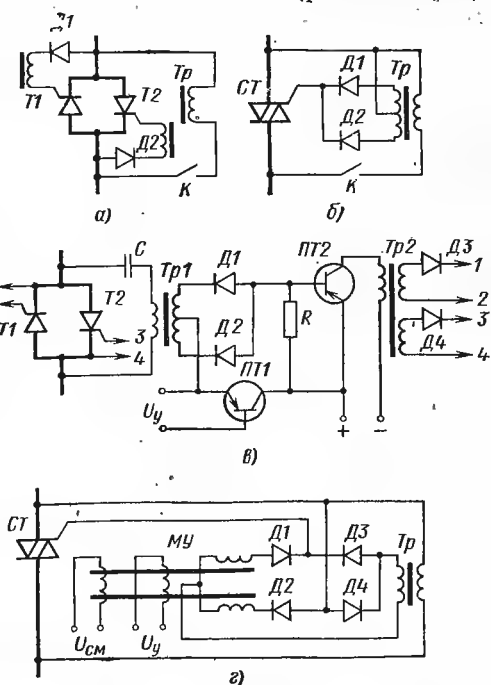


Рис. 65. Схемы независимого управления тиристорами

Напряжение, снимаемое с тиристорov, трансформируется, выпрямляется и подается на базу транзистора *ПТ1* такой полярности, чтобы он был открыт в течение всего времени существования напряжения на тиристорах. При этом спектр высокочастотных сигналов от генератора импульсов модулируется и превращается в небольшие серии импульсов, совпадающие с моментом равенства мгновенного значения напряжения сети или напряжения на конденсаторе. После подачи команды $U_{вх}$ на включение тиристорov очередной серией импульсов запускается выходное устройство *ПТЗ—Тр2*, запирающее тиристоры *T1, T2*, которые, включившись, шунтируют трансформатор *Тр1*; транзистор *ПТ1* запирается, и на транзистор *ПТЗ* выходного устройства непрерывно поступают высокочастотные сигналы от генератора импульсов *ГИ* до тех пор, пока имеется команда на включение тиристорov.

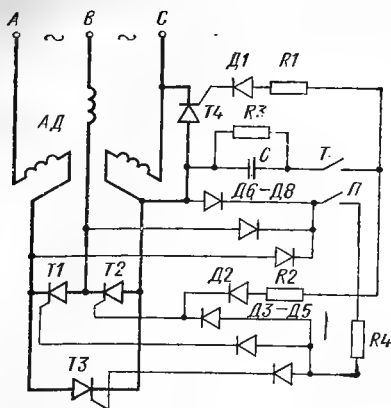
ТИРИСТОРНЫЕ КОММУТАТОРЫ ДЛЯ ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ

Разработка тиристорных коммутаторов для управления пуско-тормозными режимами асинхронного электропривода заключается в определении рациональной структуры его силовой части, наиболее полно отвечающей всем поставленным требованиям, и последующего проектирования схемы управления тиристорами. Силовую часть коммутатора конструируют в определенной последовательности. Сначала выбирают схему соединения тиристорov для выполнения заданных условий пуска и, если необходимо, реверса. После этого решают вопрос о наиболее целесообразном способе торможения и составляют силовую схему тормозного устройства коммутатора. В нереверсивных коммутаторах для реализации тормозного устройства необходимы дополнительные тиристоры, введение которых определяет многообразие возможных схемных решений с использованием любых способов торможения. В реверсивных коммутаторах часть из этих решений может быть реализована без дополнительных тиристорov.

Анализ принципиальных схем тормозных устройств и особенностей режимов торможения позволяет рекомендовать схемы силовой части пуско-тормозных тиристорных коммутаторов, наиболее рационально сочетающих достоинства основных способов эффективного торможения с минимальным числом дополнительных тиристорov тормозного устройства. Ниже приведено несколько схем таких пуско-тормозных тиристорных коммутаторов. Параметры их элементов зависят от мощности двигателя и режимов его работы. Методика определения параметров и выбора элементов рассмотрена в [1, 25]. Для характеристики порядка величин и типов используемых элементов для двух схем приведены данные, справедливые для коммута-

Рис. 67. Схема пуско-тормозного тиристорного коммутатора с зависимым управлением:

$T1-T4$ — тиристоры ТБ0-8; $D1-D8$ — диоды МД218; $R1, R2, R4$ — МЛТ-1, 150 Ом; $R3$ — МЛТ-0,5, 1,5 МОм; C — МБГО, 2 мкФ, 600 В



торов, предназначенных для управления двигателями мощностью до 4 кВт.

Наиболее простая схема пуско-тормозного тиристорного коммутатора (рис. 67) может быть применена, если обмотки двигателя соединены в звезду.

При работе в двигательном режиме открыты пусковые тиристоры $T1-T3$ в режиме торможения — тиристор $T1$ и вспомогательный тиристор $T4$, осуществляющий демпфирование тока в обмотке двигателя. Управление пусковыми тиристорами осуществляется от мостовой диодной структуры, состоящей из разделительной $D3-D5$ и выпрямительной $D6-D8$ групп диодов, в диагональ которой включены контакт и резистор.

Для торможения двигателя размыкается контакт P и замыкается контакт T . После этого закрываются пусковые тиристоры и открываются тормозные, так как анодное напряжение прикладывается к управляющим электродам тириستоров $T1$ и $T4$ через контакт T , конденсатор C , резисторы $R1$ и $R2$ и диоды $D1, D2$. Углы открывания тиристоров $T1$ и $T4$ определяются сопротивлением резисторов $R1$ и $R2$. После заряда конденсатора C током управления он как бы разрывает цепь управления и тормозные тиристоры автоматически закрываются. Резистор $R3$ предназначен для разряда конденсатора C перед очередным торможением. Время заряда конденсатора токами управления тормозных тиристоров определяет длительность протекания тормозного тока в двигатель. Поскольку ток управления тиристорами формируется из анодного напряжения, т. е. по зависимому принципу, то импульсы управления получаются узкими и фаза их автоматически синхронизируется при изменении $\cos \varphi$ нагрузки.

В зависимости от требований механизма режимы работы $T1$ и $T4$ (последовательность включения и угол проводимости) могут быть различными. Например, для уменьшения вибрации в конце торможения $T4$ должен закрываться при скорости вращения, примерно равной $0,3 \omega_{\text{ном}}$. Для малоинерционных приводов, работающих с малым статическим моментом, ток короткого замыкания одной фазы должен быть максимальным.

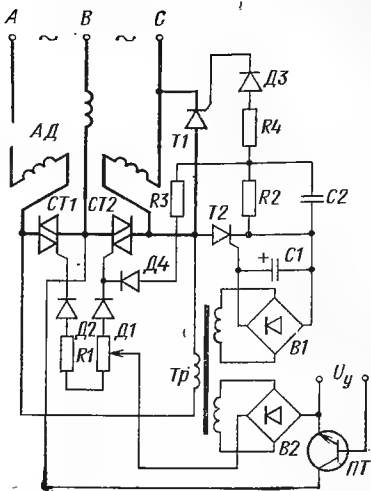
Рис. 68. Схема пуско-тормозного тиристорно-симисторного коммутатора с бесконтактным управлением:

CT1, CT2 — симисторы ТС80-8; T1 — тиристор Т25-8; T2 — тиристор КУ201Н; Д1—Д4 — МД218; В1, В2 — КИ402Е; R1 — СП2-1,47 Ом; R2 — МЛТ-0,5, 1,5 МОм; R3, R4 — МЛТ-1,150 Ом; C1 — К50-6, 50 мкФ, 15 В; C2 — МБГО 2 мкФ, 600 В; ПТ — КТ 608

В связи с этим может оказаться целесообразным раздельное управление $T1$ и $T4$.

Одна из возможных схем полностью бесконтактного коммутатора для пуска и торможения асинхронно двигателя, в силовой части которой используют как тиристоры, так и симисторы, показана на рис. 68. При пуске двигателя включаются симисторы *СТ1* и *СТ2*, соединяющие концы статорных обмоток в звезду. Отпирание симисторов происходит после отпирания транзистора *ПТ* импульсами тока со вторичной обмотки трансформатора *Тр*, первичная обмотка которого подключена на анодное напряжение симисторов. Тормозной режим наступает после снятия управляющего сигнала с транзистора *ПТ*. При торможении симистор *СТ1* переводится в выпрямительный режим и включается тиристор *Т1*, шунтирующий одну из обмоток, что приводит к сглаживанию пульсаций выпрямленного симистором тока и к увеличению его постоянной составляющей.

При работе коммутатора в двигательном режиме во вторичной обмотке трансформатора T_r наводятся небольшие короткие импульсы напряжения (из-за проводящего состояния $CT1$ и $CT2$), которые недостаточны для переключения мало-мощного вспомогательного тиристора $T2$. Если закрыть триод PT , то симисторы запираются, что вызывает рост напряжения на первичной обмотке трансформатора T_r до величины линейного напряжения сети. Возросшее напряжение на вторичной обмотке T_r достаточно для включения вспомогательного тиристора $T2$. После его переключения в проводящее состояние получает питание управляющий электрод симистора $CT1$ только при одной полярности его анодного напряжения. Управляющий электрод тормозного тиристора $T1$ также подключается на анодное напряжение, при этом тиристор $T1$ будет пропускать ток под действием ЭДС фазы двигателя. После заряда конденсатора $C2$ ток в тиристоре $T2$ прекращается и режим торможения заканчивается. Параметры контура $R2-C2$ выбирают



такими, чтобы время заряда конденсатора $C2$ было больше или равно времени торможения двигателя. Сопротивление резистора $R2$ должно обеспечить разряд конденсатора $C2$ до очередного торможения и в то же время ограничивать ток управления в $T1$ при включенном тиристоре $T2$ до величины на порядок меньшей отпирающего тока управления.

Пуско-тормозные коммутаторы с тиристорными элементами, включенными между двигателем и питающей сетью, допускают управление двигателями при любом соединении обмоток (треугольник или звезда). На рис. 69 приведена схема коммутатора, силовая часть которого построена по схеме № 4 (см. рис. 53). Схема управления выполнена комбинированной — включение пусковых тириستоров $T1—T4$ осуществляется по зависимому принципу, а в режиме торможения управление независимое, осуществляемое путем подачи на управляющие переходы тириستоров $T2$ и $T5$ непрерывного спектра высокочастотного сигнала от блокинг-генератора.

При подаче команды на включение отпирается ключевой транзистор $ПТ1$ и сигнал с трансформатора $Tr1$, первичные обмотки которого подключены параллельно управляемым тиристорам, подается на выходной транзистор $ПТ2$, который формирует импульсы, включающие тиристоры $T1—T4$. Ширина импульсов определяется временем переключения тириستоров в проводящее состояние.

После снятия команды «Пуск» и подачи напряжения на вход «Торможение» транзистор $ПТ3$ включает блокинг-генератор, собранный на триоде $ПТ4$, который генерирует высокочастотный сигнал, отпирающий тормозные тиристоры $T2$ и $T5$. В этом коммутаторе необходима блокировка, запрещающая

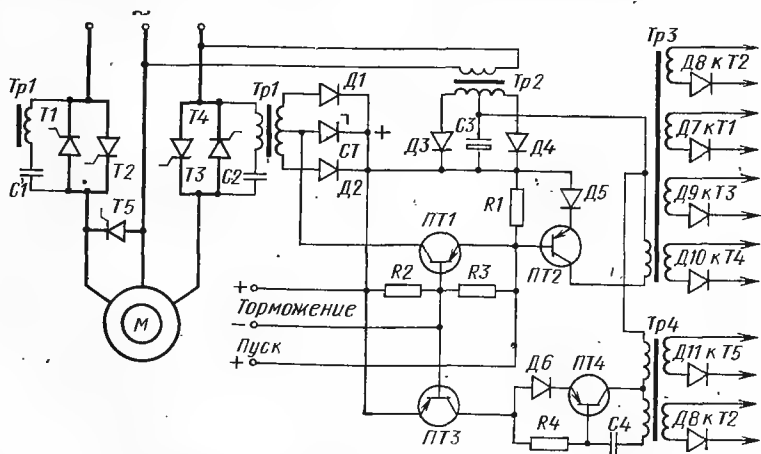


Рис. 69. Схема пуско-тормозного коммутатора с управлением тормозными тиристорами от блокинг-генератора

«одновременную подачу сигнала на вход «Пуск» и «Торможение».

Схема одного из вариантов пуско-тормозных коммутаторов с управлением конденсаторно-динамическим торможением для эффективной остановки инерционных приводов приведена на рис. 70. Схема управления состоит из блока контроля напряжения, выполненного на трансформаторах $Tr1$, $Tr2$, диодах и транзисторах $ПТ1$, $ПТ2$, генератора высокочастотных импульсов ($Tr3$, $ПТ8$) и выходных усилителей ($Tr4$ — $Tr6$, $ПТ4$ — $ПТ6$).

Напряжение, снимаемое с тиристоров, подается через трансформатор на базы транзисторов $ПТ1$, $ПТ2$, которые в открытом состоянии (если на тиристорах есть напряжение) шунтируют непрерывный высокочастотный сигнал, поступающий с блокинг-генератора, преобразуя его в короткие серии импульсов, совпадающие с переходом синусоиды напряжения на тиристорах через нуль. При подаче команды на вход «Пуск» ключевой транзистор $ПТ3$ пропускает очередную короткую серию импульсов, которыми отпираются транзисторы $ПТ4$ и $ПТ5$. Сформированные отпирающие сигналы с трансформаторов $Tr4$ и $Tr5$ включают пусковые тиристоры $T1$ — $T4$ в тот момент, когда сумма мгновенных величин напряжений сети и на конденсаторе равна нулю.

При снятии команды «Пуск» прекращается подача отпирающих сигналов на тиристоры $T1$ — $T4$ и двигатель отключается от сети. С этого момента создается режим конденсаторного

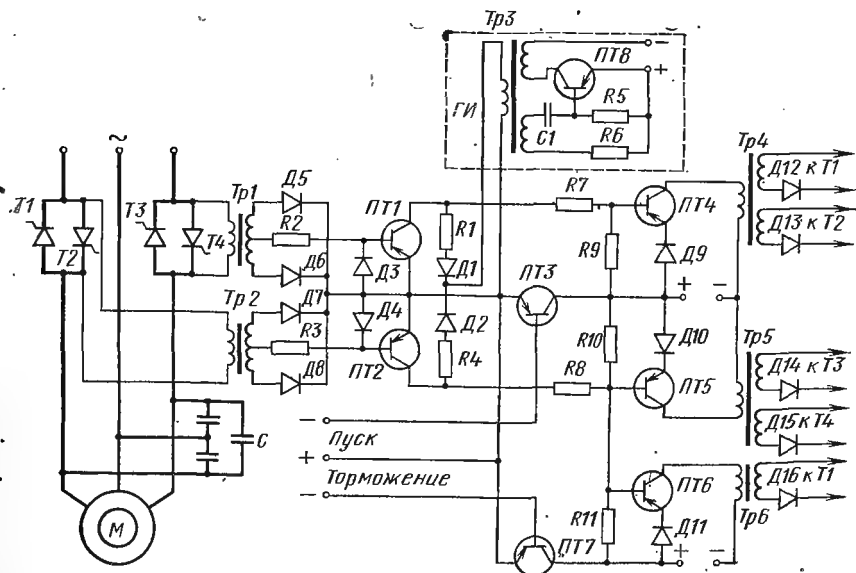


Рис. 70. Схема пуско-тормозного коммутатора с управлением конденсаторно-динамическим торможением

торможения, характеризующийся большим моментом в зоне высоких скоростей. Вторая ступень (динамическое торможение) осуществляется при подаче команды «Торможение». Для создания оптимального тормозного эффекта подачу команды «Торможение» следует производить через выдержку времени, так как включение тормозного тиристора приводит к срыву (прекращению) конденсаторного торможения. Управление тормозным тиристором в режиме динамического торможения осуществляется по такому же принципу, что и в режиме пуска. Включение ключевого триода ПТ7 приводит к подаче разрешающего сигнала от блока синхронизации на выходное устройство (Тр6, ПТ6) в определенные моменты, осуществляя отпирание тиристора Т1 в моменты, когда результирующее напряжение на нем равно нулю.

Отечественная промышленность выпускает несколько типов тиристорных коммутаторов, предназначенных для пуска и торможения асинхронных электродвигателей, например тиристорные блоки серии БСЭ 5000, предназначенные для встройки в станции контакторного управления. Блоки обеспечивают пуск и динамическое торможение двигателей мощностью до 10 кВт. Блок типа БСЭ 5201 предусматривает изменение времени торможения в пределах 0,3—0,8 с и шаговый поворот ротора двигателя. В 1977 г. начался выпуск тиристорных станций управления серии ПТУ на токи до 300 А с динамическим торможением. Тиристорные станции управления типа ТСУ, предназначены в зависимости от модификаций для пуска, реверса и динамического торможения асинхронных двигателей на токи от 4 до 160 А.

1. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами. М., «Энергия», 1970. 125 с. Авт.: Л. П. Петров, В. А. Ладензон, М. П. Обуховский, Р. Г. Подзолов.
2. Буштян Л. В., Петров Л. П. Расчет характеристик асинхронных короткозамкнутых двигателей при конденсаторном торможении.— В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование. Киев, «Техника», 1968, № 7, с. 58—64.
3. Буштян Л. В., Петров Л. П., Рашкович М. П. Устройство для торможения асинхронного электродвигателя.— «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки» Авт. свид. № 230252, класс 21 с. 59/58, 1968, № 34.
4. Бернштейн-Коган В. С., Драницкий Л. В., Кузнецова Т. А. Электрооборудование координатно-расточных и резьбошлифовальных станков. М., «Энергия», 1969. 78 с.
5. Готлинский Д. И., Шель В. М. Конденсаторное торможение асинхронных электроприводов станков.— «Станки и инструмент», 1973, № 9, с. 14—16.
6. Закгейм А. Н. Электролитические конденсаторы. М., ГЭИ, 1963. 347 с.
7. Каплан Н. А., Лапидус А. И. Схемы торможения асинхронных двигателей с использованием короткого замыкания через вентиль.— «Станки и инструмент», 1969, № 12, с. 9—10.
8. Мейстель А. М. Динамическое торможение приводов с асинхронными двигателями. М., «Энергия», 1967, 136 с.
9. Методические указания по управлению асинхронными короткозамкнутыми двигателями в специальных режимах работы. М., ОНТИ ЭНИМС, 1969, 299 с.
10. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением. М., «Энергия», 1976. 200 с. Авт.: Л. П. Петров, В. А. Ладензон, Р. Г. Подзолов, А. В. Яковлев.
11. Парфенович О. Н., Бляхман А. И. Устройство для торможения асинхронного двигателя.— «Бюллетень изобретений и товарных знаков.» Авт. свид. № 152699, класс 21 с. 59/58, 1963, № 2.
12. Петров И. И., Мейстель А. М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. М., «Энергия», 1968. 264 с.
13. Петров Л. П. Способ торможения асинхронного электродвигателя.— «Бюллетень изобретений и товарных знаков». Авт. свид. № 105619, класс 21 с. 59/58, 1957, № 5.
14. Петров Л. П. Способ электрического торможения асинхронного короткозамкнутого двигателя.— «Бюллетень изобретений и товарных знаков». Авт. свид. № 117350, класс 21 с. 59/58, 1959, № 10.
15. Петров Л. П. Способ электрического торможения асинхронного электродвигателя.— «Бюллетень изобретений и товарных знаков.» Авт. свид. № 117264, класс 21 с. 59/58, 1959, № 2.
16. Петров Л. П. Способ торможения асинхронного двигателя.— «Бюллетень изобретений и товарных знаков». Авт. свид. № 119222, класс 21 с. 59/58, 1959, № 10.

17. Петров Л. П. Нелинейная модель для исследования динамики асинхронных электроприводов.—«Электричество», 1973, № 8, с. 61—65.

18. Петров Л. П., Буштян Л. В. Тепловой расчет электролитических конденсаторов для торможения асинхронных двигателей.— В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование. Киев, «Техника», 1966, № 4, с. 17—21.

19. Подзолов Р. Г. Способ бесконтактной коммутации конденсаторов.— «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки» (Авт. св. № 389626, класс 21, с 57/15), 1973, № 29.

20. Проектирование электрооборудования автоматических линий. М., ОНТИ ЭНИМС, 1971, вып. 1, 128 с.

21. Рашкович М. П., Шапарев Н. К., Шкловский Б. И. Реверсивный асинхронный электропривод с конденсаторно-противотоковым торможением.— «Электротехническая промышленность. Электропривод», 1970, № 4, с. 20—22.

22. Харизоменов И. В. Электрооборудование и электроавтоматика металлорежущих станков. М., «Машиностроение», 1975. 326 с.

23. Черановская Е. К., Шапарев Н. К. Контактнo-тиристорное управление реверсивным асинхронным электроприводом.— В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование. Киев, «Техника», 1974, № 18, с. 40—44.

24. Шель В. М., Подзолов Р. Г., Готлинский Л. И. Выбор схемы торможения для точной остановки асинхронного электропривода.— «Станки и инструмент», 1971, № 7, с. 11—12.

25. Шубенко В. А., Браславский И. Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М., «Энергия», 1972. 200 с.

26. Электрооборудование металлорежущих станков и автоматических линий. Реле контроля скорости. М., ОНТИ ЭНИМС, 1972, вып. РЭ-65-3-72. 21 с.

27. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. М., «Энергия», 1967. 200 с. Авт.: М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Особенности режима торможения асинхронных двигателей	5
Некоторые особенности торможения противовключенном и динамического.	21
Конденсаторное торможение	39
Конденсаторно-динамическое и конденсаторно-магнитное торможение	60
Особенности выбора и реализации тормозных устройств	85
Тиристорное управление тормозными режимами	101
Список литературы	133

ИБ № 249.

Лев Поликарпович ПЕТРОВ, Ричард Георгиевич ПОДЗОЛОВ, Леонид Викторович БУШТЯН

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОРМОЖЕНИЕМ СТАНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Редактор Н. П. Гурвич

Технические редакторы И. В. Завгородняя, Л. А. Макарова

Обложка художника Ф. Ю. Элембаумана

Корректор И. М. Борейша

Сдано в набор 13.06.78. Подписано в печать 15.08.78. Т-09688.

Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 3. Гарнитура литературная.

Печать высокая. Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 8,65. Тираж 6000 экз.

Заказ 1589. Цена 45 к.

Издательство «Машиностроение». 107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088. Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.